

Magyar Tudomány

HÍDSZERKEZETEK

Vendégszerkesztő: Kollár László

Megjegyzések a globális felmelegedéshez

Töprengések a vízről

Az atomi ütközések nyomában

Csillagok és atommagok

„Controllare” necesse est

2008•4

Főszerkesztő:

CSÁNYI VILMOS

Vezető szerkesztő:

ELEK LÁSZLÓ

Olvasószerkesztő:

MAJOROS KLÁRA

Szerkesztőbizottság:

ÁDÁM GYÖRGY, BENCZE GYULA, CZELNAI RUDOLF, CSÁSZÁR ÁKOS, ENYEDI GYÖRGY,
KOVÁCS FERENC, KÖPECZI BÉLA, LUDASSY MÁRIA, NIEDERHAUSER EMIL,
SOLYMOSSI FRIGYES, SPÄT ANDRÁS, SZENTES TAMÁS, VAMOS TIBOR

A lapot készítették:

CSAPÓ MÁRIA, GAZDAG KÁLMÁNNÉ, HALMOS TAMÁS, JÉKI LÁSZLÓ, MATSKÁSI ISTVÁN,
PERECZ LÁSZLÓ, SIPOS JÚLIA, SPERLÁGH SÁNDOR, SZABADOS LÁSZLÓ, F. TÓTH TIBOR

Lapterv, tipográfia:

MAKOVECZ BENJAMIN

Szerkesztőség:

1051 Budapest, Nádor utca 7. • Telefon/fax: 3179-524
matud@helka.iif.hu • www.matud.iif.hu
Kiadja az Akaprint Kft. • 1115 Bp., Bártfai u. 65.
Tel.: 2067-975 • akaprint@akaprint.axelero.net

Előfizethető a FOK-TA Bt. címén (1134 Budapest, Gidófalvy L. u. 21.);
a Posta hírlapüzleteiben, az MP Rt. Hírlapelőfizetési és Elektronikus
Posta Igazgatóságánál (HELP) 1846 Budapest, Pf. 863,
valamint a folyóirat kiadójánál: Akaprint Kft. 1115 Bp., Bártfai u. 65.

Előfizetési díj egy évre: 8064 Ft
Terjeszti a Magyar Posta és alternatív terjesztők
Kapható az ország igényes könyvesboltjaiban

Nyomdai munkák: Akaprint Kft. 26567
Felelős vezető: Freier László
Megjelent: 11,4 (A/5) ív terjedelemben
HU ISSN 0025 0325

TARTALOM

Hídszerkezetek – a tudománytól a megvalósulásig

Vendégszerkesztő: Kollár László P.

Kollár László P.: Bevezető	386
Dunai László – Hegedűs István – Kollár László P. – Lajos Tamás: A dunaujvárosi Pentele híd erőtani méretezéséhez kapcsolódó elméleti és kísérleti vizsgálatok	394
Horváth Adrián – Nagy Zsolt: A dunaujvárosi Pentele híd tervezése	410
Miroslav Mašačík – Agócs Zoltán: Apollo, a pozsonyi új Duna-híd	429
Kisbán Sándor: Az M0-s északi Duna-híd – ferdekábeles Nagy-Duna-ág-híd	435
Wellner Péter: A Kőröshegyi völgyhíd felszerkezetének tervezése és építése	441
Mátyássy László: Nyolcvan méterrel a föld felett (a Kőröshegyi völgyhíd tervezése)	450

Tanulmány

Reményi Károly – Gróf Gyula: Megjegyzések a globális felmelegedéshez	458
Somlyódy László: Töprengések a vízről – lépéskényszerben	462
Pálinkás József: Emberi képzeletünk próbája: az atomi ütközések nyomában	474
Gyürky György: Csillagok és atommagok	486
Keviczky László: „Controllare” necesse est – szabályozni szükséges	494

Tudós fórum

Állásfoglalás a darwini evolúciós elmélet védelmében	506
Az MTA öt osztályának közös állásfoglalása a természettudományos oktatásról	507
Szegedi Széchenyi-díjas akadémikusok felhívása a száz leggazdagabb magyarhoz	509
Díjak, kitüntetések	510

Megemlékezés

Gergely János (<i>Erdei Anna</i>)	514
---	-----

<i>Kitekintés (Jéki László – Gimes Júlia)</i>	517
---	-----

Könyvszemle

Benedek pápa könyve Jézusról (<i>Erdő Péter</i>)	520
--	-----

Hídszerkezetek a tudománytól a megvalósulásig

BEVEZETŐ

Kollár László P.

az MTA rendes tagja, egyetemi tanár
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
lkollar@eik.bme.hu

Az építőmérnöki tevékenység látványos eredményei a nagy hídszerkezetek, amelyek jelentősebb folyókat, völgyeket, szorosokat hidalnak át. Az elmúlt évben hazánkban három nagy hídszerkezet építése folyt, illetve folyik: a Pentele híd Dunaújvárosban, a Kőröshegyi völgyhíd és az M0-s körgyűrű északi Duna-hídja, a Megyeri híd. Néhány éve északi szomszédunknál egy fontos Duna-híd épült: az Apollo híd Pozsonyban. A *Magyar Tudomány* ezen száma ezekkel a hídszerkezetekkel, tervezésükkel, kivitelezésükkel, a hidakhoz kapcsolódó tudományos kutatásokkal foglalkozik.

A Kőröshegyi völgyhíd eddig Magyarországon a legnagyobb volumenű hidépítés: a feszített betonhíd teljes hossza 1872 m, a tipikus támaszköz 120 m, a leghosszabb pillérek magassága 80 méter, amely egy 25 emeletes épületnek felel meg. A Pentele híd mederhídja egy kosárfül alakú ívhíd, amelynek támaszköze (azaz a megtámasztások közti távolsága) 308 méter, ez a maga kategóriájában a világon a legnagyobb. A mederhidat a Duna partján

szerelték és a 8700 tonnás szerkezetet úsztatással juttatták el a végső helyére. Ilyen tömegű szerkezetet folyón, tudomásunk szerint még nem szállítottak; a híd úsztatása is világrekord. Az M0-s északi Duna-hídjának legnagyobb támaszköze 300 m, ez az első magyarországi ferdekábeles híd.

Mitől függ egy híd kialakítása?

Egy híd az úthálózat egy eleme. A főbb utak, autóutak és autópályák egyrészt *összekötnek* településeket, országrészeket, országokat, másrészt *elválasztanak* egymáshoz esetleg igen közel lévő településeket, hiszen egy autópályára csak a kiépített csomópontban lehet ráhajtani, és csak a hidaknál lehet őket keresztezni. Az autóút és az autópálya az átutazóknak kényelmet jelent, a helyben lakóknak esetleg bosszúságot, sőt a közelben lakóknak az ingatlanok értékcsökkenése miatt akár közvetlen anyagi kárt is okozhat. A fentiek miatt egy-egy út (és híd) nyomvonalának kijelölése általában igen sok, egymásnak ellentmondó szem-



1. ábra • A Firth of Forth vasúti híd
(Baker, Anglia, 1890, támaszköz: L=521 m. Fényképezte Kollár Lajos)

pont figyelembe vétele alapján történhet, és ezeknek csak egyike, hogy ehhez milyen méretű (és költségű) híd kell hogy tartozzék. Így volt ez a három épülő hidunknál is (Molnár, 2007; Domanovszky, 2007).

Az építőmérnöki szerkezetektől természetesen elvárjuk, hogy a megkívánt funkcionak eleget tegyenek, és kellő teherbírásúak legyenek, de ezenkívül gyakran *esztétikai igényeket* is támasztunk. A nagy hidaknál, ahol a helyes szerkezeti formától való eltérés nagyon sokba kerülhet, általában a statikai szempontok

alapján döntenek el a híd alakját. Így történt ez például a híres skóciai Firth of Forth vasúti hídnál is (1. ábra). A híd megjelenését elkészülte után sokan támadták, a kritikusok szerint a „híd borzasztóan ronda” (Billington, 1983). Mások (például a híd tervezője) viszont amellett érveltek, hogy a helyes szerkezeti forma a szépség legfontosabb ismérve. Arra, hogy az esztétikai követelmény néha ellentmond a szerkezeti megkívánt formának, jó példa a Szabadság híd. A Szabadság híd középső része egy befüggesztett tartó. (Ha átsétálunk



2. ábra • Szabadság híd (Fekete-házy János, Budapest, 1896, támaszköz: L=171 m)
A jobb oldali képen látható a befüggesztett rész megtámasztása.

a hídon, akkor megfigyelhetjük a középső nyílásban található csapokat, amelyek a befüggesztett rész csuklós megtámasztását biztosítják. (2. ábra) A Szabadság híd statikailag helyes kialakítása a nyílás közepén (a Firth of Forthhoz hasonlóan) az lett volna, ha a befüggesztett rész szerkezeti magassága a híd közepe felé növekszik. A kialakítás, *esztétikai okokból*, ezzel ellentétes: a befüggesztett rész tartómagassága a híd közepe felé csökken. Esztétikai megfontolások alapján alakították ki a Pentele híd kábelelrendezését és (építész közreműködésével) a pillérek szilvamag alakját.

A híd kialakítása szempontjából elődleges kérdés a rendelkezésre álló *építési technológia*. Ez mind a négy híd esetén fontos szempont volt. A Dunán a teljes beállványozás egyrészt költséges, másrészt a hajóforgalom miatt igen nehezen megvalósítható, a 80 méter magasú Kőröshegyi völgyhíd esetében nehezen kivitelezhető. Az Apollo hidat a parton szerelték, majd beforgatták, a Pentele hidat *beúsztatták*, az M0-s hidat pedig 12 m hosszúságú elemekből szerelik össze, amelyeket a ferde kábelekkkel támasztanak meg (Windisch, 2007). Ez utóbbi az ún. *szabad szerelési technológia*. A Pentele híd ártéri acélhídjait *betolták*. A kőröshegyi-híd kivitelezéstechnológiája a *szabadbetonozás* volt (az utolsó szakaszban a szabadszerelés), aminek az a lényege, hogy a hidat a pillérektől indulva építik egy segédhíd felhasználásával. A segédhídon helyezkednek el a zsaluzó kocsik, itt történik a betonozás, a beton kötése után elhelyezik a feszítő kábeleket. Ezután a zsaluzó kocsikat áthelyezik, és megkezdik a következő szakasz betonozását. Két egymás melletti pillérről indulva a pályaszerkezetet egymás felé építik, s a nyílások közepén összezárják (Wellner, 2008).

A kellő építési sebességek és a nagy méretek eléréséhez egyre jobb minőségű *anyagokat*

alkalmaznak. A Pentele híd esetén először alkalmazták hazánkban S460-as acélt, (ennek szilárdsága a szokásosnál 30 %-kal magasabb). A szabad betonozáshoz alkalmazott betonok szilárdsága körülbelül kétszerese a szokványos betonokénak. Ennél még fontosabb, hogy a betonszilárdulás igen gyorsan játszódott le, és így körülbelül tíznaponként lehetett egy-egy új szakaszt elkészíteni.

Mekkora egy híd biztonsága?

Felmerül a kérdés, hogy mekkora biztonsággal rendelkeznek az építőmérnöki szerkezeteink. A hídépítés hőskorában az építető belátására volt bízva, hogy mekkora biztonságot alkalmaz. A mérnökök általában 3 és 7 közötti *biztonsági tényezőt* alkalmaztak, ami azt jelentette, hogy a szerkezet törését okozó teher mintegy háromszor, hétszer akkora volt, mint a szerkezet várható terhe. A biztonsági tényezőt sokszor gúnyosan „tudatlansági tényezőnek” is nevezték, mivel a mérnök annál nagyobb tényezőt alkalmazott, minél kevésbé volt tisztában a szerkezet viselkedésével. Az elmúlt száz évben a biztonság szintjét az építőipari szabványok írják elő, idehaza korábban a Magyar Szabvány, amelynek szerepét fokozatosan a közös európai szabvány, az Eurocode veszi át. Ezek úgy állapítják meg a figyelembe veendő terheket, az anyagok szilárdságát, hogy kellően kicsiny legyen annak a valószínűsége, hogy a szerkezet a használati idő alatt súlyosan károsodjon, összedőljön. Ez a kicsiny valószínűség mintegy 10^{-4} – 10^{-5} , vagyis minden tíz-, százszázadik hídnál fordulhat elő, hogy súlyos károsodás, esetleg összedőlés következik be. (Téves tehát az a vélekedés, hogy egy helyesen méretezett szerkezettel nem lehet súlyos probléma; csak annyit mondhatunk, hogy ennek valószínűsége nagyon kicsiny. Az anyagok szilárdsága ingadozik, a

méretek sose pontosak, lehetséges, hogy a szokásosnál sokkal erősebb szél fúj; ha ezek egyszerre következnek be, akkor a híd súlyosan károsodhat.) A tényleges katasztrófák elemzése mégis azt mutatja, hogy ezek akkor következtek be, ha tervezési és/vagy kivitelezési hiba történt, vagy egy olyan jelenség játszott szerepet, amelyet korábban a mérnökök nem ismertek.

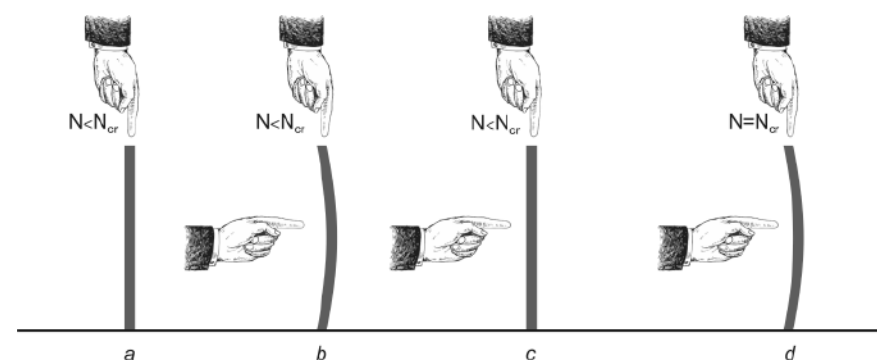
Milyen hatásokra méreteziünk egy hidat?

Előjáróban tisztázzuk, hogy hogyan is mehet tönkre egy szerkezet. Az egyik lehetőség, amit mindenki jól ismer, az ún. *szilárdsági* tönkremenetel. A szerkezet anyagának teherbírását szilárdságnak nevezzük; ha a terhelésből keletkező feszültség meghaladja a szilárdságot, az anyag tönkremegy. A szerkezetek azonban tönkremehetnek *kihajlással* is, ha például egy karcsú rudat nyomunk, akkor a nyomóerő egy bizonyos értékénél a rúd hirtelen meggörbül, és további terhet nem tud felvenni (3. ábra). (Az ív kihajlására példát láthatunk [Dunai et al., 2008] 2. ábráján.) Vékonyfalú szerkezet esetén a szerkezet tönkremehet *horpadással* is. Ezt bárki kipróbálhatja egyszer

rűen egy fém sörösdoboz megnyomásával, ami a nyomás következtében hirtelen meghulámosodik, azaz horpad. (A kihajlást és a horpadást együttesen stabilitásvesztésnek nevezzük, a stabilitásvesztést okozó erőt pedig kritikus erőnek.)

Ezeknek a jelenségeknek a figyelembe vétele – szokványos szerkezetek esetében – ma már rutinfeladat a mérnököknek, és a méretezési módszerek szabványosítva is vannak. A szabványok azonban nem intézkednek minden esetről, és bizonyos esetekben erősen egyszerűsített eljárást tartalmaznak, amelyek nagymértékben a biztonság javára közelítenek (gondoljunk a „tudatlansági tényezőre”). Emiatt néha a szabványoktól eltérő, annál pontosabb vizsgálatokat végzünk. (Ilyen „pontos” vizsgálatok történtek a Pentele híd esetében is (Dunai et al., 2008), és a külföldi ellenőr, aki csupán a szabvány egyszerűsített vizsgálata alapján méretezett, először nem – csak a részletes vizsgálat megismerése után – fogadta el a híd számítását.)

Az egyes jelenségek ismertté sajnos sokszor építési katasztrófák kapcsán váltak, és ezek után dolgozták ki a tudósok és a mérnökök



3. ábra • A kihajlás illusztrálása egy „vonalzón”. Ha a kritikus erőnél kisebb erővel nyomjuk a rudat (vonalzót), akkor a rúd tengelye egyenes marad (a), egy vízszintes erő hatására meggörbül (b), de az erő elvétele után visszanyeri az egyenes alakot (c). Ha a nyomóerő elér egy bizonyos értéket (ez a kritikus erő), akkor a rúd hirtelen meggörbül, „kihajlik” (d)

azokat a méretezési módszereket, amelyekkel a jelenségeket vizsgálni tudták (Petroski, 1992, 1994; Medved, 2001). A kihajlás jelensége például (noha azt matematikailag már Leonhard Euler vizsgálta) a hídépítők számára akkor vált ismertté, amikor az 1846-ben épített Dee-híd egy évvel az átadás után leszakadt; az emberi lépés okozta rezonanciára akkor figyeltek fel, amikor 1850-ben Angers-nél ötszáz katonai lépést tartva haladt át a hídon, amely a katonák felének halálát okozva összedőlt; és a fáradás jelenségére (vagyis arra, hogy az ismételt terhelés alacsony teherszinten is az anyag törését okozhatja) akkor figyeltek fel, amikor az USA-ban több vasúti híd is leszakadt. (Ennek hatására 1850-ben a pennsylvaniai hatóság úgy rendelkezett, hogy minden acélhidat fára kell cserélni.) Folytathatnánk a példák sorát. A tervezők az elkövetett hibák alapján sokat tanultak, a szerkezetek kialakítását, a méretezési módszereket korrigálták. Robert Stephenson például, a Dee-híd tervezője (a gőzgép feltalálójának fia), kora egyik legnagyobb hídépítője a Britannia hidat téglalap keresztmetszetű tartóként alakította ki, amelynek belsejében haladt a vonat (4. ábra). A tervezés során azt találták, hogy a tartó legveszélyesebb tönkremeneteli formája a felső (nyomott) övek horpadása. Ezt számítással nem tudták vizsgálni, ezért kísérleteket végeztek, és a szerkezeten az alsó és felső övet (hogy a horpadási tönkremenetelt elkerüljék) cellásra alakították ki.

Ma részben a károkból tanulva, részben az elvégzett kutatómunkának köszönhetően, a fenti jelenségeket megnyugtatóan figyelembe vehetjük egy-egy hídszerkezet méretezésében. A hidakat az önsúly, a járműteher, a meteorológiai hatások, a földrengés együttes hatására kell méretezni és kialakítani, ami igen sokszor innovatív megoldásokat követel. Erre

egy példa, hogy mivel egy híd hosszirányban a hőmérséklet hatására jelentős mozgásokat végez, ezért hosszirányban általában egy pillérnél rögzítik, és a többinél megengedik a híd mozgását. Földrengés esetén viszont a teljes földrengésteher egy ponton való levezetése nehézséget jelenthet, emiatt célszerű lenne a felszerkezetet több ponton rögzíteni. Ezt a dilemmát úgy lehet feloldani, hogy a szerkezetet hidraulikus berendezésekkel támasztják meg, melyek a lassú (hőmérsékleti) mozgásokat megengedik, a gyors (földrengés) mozgással szemben viszont ellenállást fejtenek ki (Kisbán, 2008). Egy másik probléma a kábe-



4. ábra • A Britannia híd keresztmetszete (Robert Stephenson, Anglia, 1850, támaszköz: $L=140$ m)

lek táncolása a szél hatására. Érdekes módon előfordul, hogy ugyan maga a száraz kábel nem táncol a szélben, de a kábelben lefolyó esővíz esetén a kábel és víz együttese igen (Kisbán, 2008, Dunai et al., 2008), amit a kábelben kialakított bordázattal lehet elkerülni.

Az olvasóban felmerülhet a kérdés: nem fordulhat-e elő, hogy ma épülő hídjainknál is van olyan jelenség, amelyre a tervező nem gondolt, és így esetleg a híd nem biztonságos, összedől? A válasz erre, hogy ez nagyon kevésbé valószínű, de teljes bizonyossággal nem zárható ki. Az elmúlt kétszáz évben hatalmas mennyiségű tudás halmozódott fel, az egyes jelenségek figyelembevételére kipróbált és sokszorosan igazolt méretezési módszerek vannak. A tervező számításait mindig független ellenőr kontrollálja. A számításban egyrészt használnak egyszerű, közelítő modelleket, másrészt összetett numerikus számításokat. Ez utóbbi ma szinte mindig az ún. véges elemes számítás (Horváth – Nagy, 2008), amely kiterjed a szerkezet minden kényes csomóponti részletére is. Ennek ellenére, újszerű kialakítás vagy új anyag esetén érhetik az építetők meglepetések. Emiatt ilyen esetekben célszerű lehet *modellkísérletet* végrehajtani, amely az esetleges nem várt jelenségeket is megmutat(hat)ja. Így vizsgálták a Pentele híd kihajlását, és a hídra ható szélterhet is (Dunai et al., 2008). Az olvasó megnyugodhat, hogy hídjaink mai tudásszintünk szerint jól vannak megtervezve.

Egy nemrég történt fiaskóról mégis be kell számolnunk: 2000-ben adták át a londoni, Temzén átívelő Millennium hidat, amelyet a nagy tapasztalattal rendelkező, nemzetközileg elismert Arup vállalat tervezett. Ennek ellenére az átadás napján a hidat le kellett zárni, mert a hídon lévő tömeg alatt a híd jelentős vízszintes (periodikus) mozgásokat végzett,

ami általános riadalmat keltett (<http://www.arup.com/MillenniumBridge/challenge/>). A híd egy szokatlanul karcsú szerkezet, de a kor (korunk!) ismeretei szerint korrektül volt megtervezve. A mérnökök először értetlenül álltak a jelenség előtt. A későbbi vizsgálat azt mutatta, hogy a híd vízszintes rezgésére az emberek mozgása úgy szinkronizálódott, hogy a lépésekből származó vízszintes erők egyre nagyobb mozgásokat okoztak. (A fenti webcímen található videón meg lehet figyelni, ahogy az emberek testüket a haladási irányukra merőlegesen, vízszintesen is mozgatva, mintegy „táncolva” léptek.) Ez a szinkronizáció eddig teljesen ismeretlen volt. (A későbbiekben hidraulikus csillapítókat építettek be a hídba, amelyek ezt a jelenséget megszüntették.) Ez arra figyelmeztet bennünket, hogy újszerű szerkezet esetén fokozott gondossággal kell eljárni.

Mi a tudomány szerepe?

Fel kell tennünk a kérdést, miért játszik fontos szerepet a tudomány a mérnöki tevékenységben? Három főbb területet emelek ki:

- a tudományos eredmények közvetlen felhasználása,
- az ismeretek gyűjtése – újszerű feladatok megoldása,
- a mérnökképzés.

Az első, vagyis a tudományos eredmények közvetlen felhasználására egy híd megvalósításához, nagyon sok példát lehet hozni. A méretezés teljes rendszere a tudományos kutatás eredményeképpen jött létre. Erről beszámolunk e számban *A dunaiújrósi Pentele híd erőitani méretezéséhez kapcsolódó elméleti és kísérleti vizsgálatok* (Dunai et al., 2008) című cikkben is, és kiemelném, hogy a cikk első szerzője akadémiai doktori értekezésében tézist is megfogalmazott a Pentele híd mérete-

zésével kapcsolatban. A híd beúsztatási állapotának ellenőrzése során egy jelenleg is folyamatban lévő alap kutatási projekt (OTKA To49305) eredményeit alkalmazták, amelynek tárgya acélszerkezetek méretezése számítógépi szimuláció (más néven „virtuálisan végrehajtott kísérletek”) alapján. Egy apró, de tanulságos példát ismertetünk az alábbiakban. A Kőröshegyi völgyhíd pilléreinek alján a falvastagság 45 centiméter (Mátyássy, 2008), amely tekintélyes méret, de ha a pillér keresztmetszetéhez viszonyítjuk, ez egy vékonyfalú rúd, hiszen a pillér szélessége 13 méter. A pillérnek mint vékonyfalú rúdnak kell viselnie a nehéz (feszített beton) felszerkezet súlyát és a földrengésből keletkező terheket is. Mivel a pillér vékonyfalú szerkezet, így egyik veszélyes tönkremeneteli formája a *horpadás*, (hasonlóképpen, mint az előbbieken említett sörösdoboznál). Egy érdekessége az elvégzett vizsgálatoknak, hogy a pillér horpadásvizsgálatához alap kutatási eredményt lehetett felhasználni (OTKA To32053), mégpedig olyan eredményt, amelyeket műanyag (kompozit) rudak vizsgálatához fejlesztettek ki. A viselkedés szempontjából ugyanis mindegy, hogy mekkora szerkezetről van szó: a mechanika és a matematika egyenletei egyaránt használhatók egy 80 m hosszú pillérre és egy másfél méteres rúdra. A vizsgálatok végeredménye az volt, hogy célszerűen úgy kell kialakítani a keresztmetszetet, hogy a pillérben középen egy diafragma (azaz keresztfal) legyen, amely meggátolja a fal horpadását.

Nagyon fontos az is, hogy a tudomány művelése során olyan ismeretek gyűlnek össze, olyan tudás halmozódik fel, amelyik képessé teszi a mérnököt arra, hogy újszerű kérdésekre választ tudjon adni. Ennek egyik példája a földrengési méretezés, amely Magyarországon eddig nem volt kötelező, és így

nem is volt szokásos. Ezen a területen korábban többen végeztek kutatómunkát. A kutatómunka eredményeit ugyan nem használták a hidak tervezésénél, de a kutatómunka kapcsán felhalmozódó ismeretek tették a szakértőket képessé arra, hogy a numerikus számítások eredményeit kontrollálják, és a számítási modelleket megfelelően módosítsák (Vigh et al., 2006).

A harmadik, ami lehet, hogy fontosabb, mint az első kettő, hogy a tudósoknak és a tudományos gondolkodásnak alapvető szerepük van a mérnökképzésben. A félreértés elkerülésére hangsúlyoznunk kell: nem az a célja a mérnökképzésnek, hogy tudósok kerüljenek ki a hallgatók közül (bár azok is kikerülnek), hanem az, hogy gondolkodó mérnökökké váljanak, akik képesek az új, innovatív feladatok megoldására, a jó szerkezetek megvalósítására. Ennek hátterét adja a tudományos kutatás. Az új anyagokat, új méretezési módszereket, innovatív megoldásokat általában először a kutatásokban vizsgálják, így ezek csak akkor tudnak kicsiny késéssel beépülni az oktatásba, ha az oktatók a kutatási, fejlesztési munkákban részt vesznek.

Mekkora munka egy híd tervezése és építése?

Harminc évvel ezelőtt az az ökölszabály volt ismert, hogy egy híd statikai számítása körülbelül annyi oldal, ahány méter a híd támaszköze. Vagyis egy húszméteres hídé húsz oldal, egy háromszáz méteres Duna-hídé háromszáz oldal. Ez a szabály ma már egyáltalán nem érvényes. A Pentele híd esetében például a kiadott iratok összmenyisége mintegy tízezer(!) oldal. Csak a Főmterv Zrt. által kiadott tervek területe kb. 1500 m². Talán a fenti számok is érzékeltetik, hogy milyen elképesztő munka, mekkora mérnöki teljesítmény ezeknek a nagy hidaknak a létrehozása. Csak úgy

jöhettek létre, hogy a hazai hídtervező és hídépítő cégek és az elméleti háttérrel adó egyetem példásan együttműködött. Büszkék lehetünk rájuk. Az összes együttműködő felSOROLÁSÁRA NINCIS LEHETŐSÉGÜNK, AZ ALÁBBIKBAN CSAK A HIDAK TERVEZŐIT ADJUK MEG:

Apollo híd Pozsonyban • Felelős tervező: Miroslav Mat' aščík, Alfa 04 Tervezőhivatal. Társtervezők: Agócs Zoltán, Eugen Chladný, Szlovák Műszaki Egyetem

Pentele híd Dunaújvárosban • Felelős tervező: Horváth Adrián, Főmterv Zrt. Felszerkezet tervezője: Nagy Zsolt, Főmterv

IRODALOM

- Billington, David P. (1983): *The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering*. Princeton University Press, Princeton
- Domanovszky Sándor (szerk.) (2007): *A dunaújvárosi Duna-híd megvalósítása 2004–2007*. Vegyész Zrt.–Hídépítő Zrt., Budapest
- Dunai László – Hegedűs I. – Lajos T. – Kollár L. (2008): A dunaújvárosi Pentele Duna-híd erőtan méretezéséhez kapcsolódó elméleti és kísérleti vizsgálatok. Magyar Tudomány. 4.
- Horváth Adrián – Nagy Zsolt (2008): A dunaújvárosi Pentele Duna-híd tervezése. Magyar Tudomány. 4
- Kisbán Sándor (2008): Az M0-s Északi Duna-híd. Magyar Tudomány. 4.
- Mátyássy László (2008): Nyolcvan méterrel a föld felett (A kőröshegyi völgyhíd tervezése). Magyar Tudomány. 4.
- Medved Gábor (2001): *Történetek a világ hidjairól*. Terc, Budapest

Zrt. Alépitmény tervezője: Nagy István, Főmterv Zrt.

Kőröshegyi völgyhíd • Felelős tervező: Wellner Péter, Hídépítő Zrt. A híd társtervezője: Mátyássy László, Pontterv Zrt.

Megyeri híd (M0-s északi Duna-híd) • Felelős tervező: Hunyadi Mátyás, Céh Zrt. Ferdekábeles híd tervezője: Kisbán Sándor, Céh Zrt.

Kulcsszavak: *híd, méretezés, tervezés, kivitelezés, tudomány, Apollo híd, Pentele híd, Megyeri híd, Kőröshegyi völgyhíd*

- Molnár László (2007): *Magyarország úthálózatának távlati fejlesztése*. Elhangzott az MTA-n, 2007. május 10-én, a *Hídszerkezetek (A tudománytól a megvalósulásig)* című tudományos ülésen
- Petroski, Henry (1992): *To Engineer is Human. The Role of Failure in Successful Design*. Vintage, New York
- Petroski, Henry (1994): *Design Paradigms. Case Histories of Error and Judgement in Engineering*. Cambridge University Press, Cambridge
- Vigh Gergely – Dunai L. – Kollár L. (2006): Numerical And Design Considerations Of Earthquake Resistant Design of Two Danube Bridges, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Sept. 3-8, 1420*. 1–10.
- Wellner Péter (2008): A kőröshegyi völgyhíd felszerkezetének tervezése és építése. Magyar Tudomány. 4.
- Windisch László (2007): *Az M0-s északi Duna-hídja, kivitelezési kérdések*. Elhangzott az MTA-n, 2007. május 10-én, a *Hídszerkezetek (A tudománytól a megvalósulásig)* című tudományos ülésen

A DUNAÚJVÁROSI PENTELE HÍD ERŐTANI MÉRETEZÉSÉHEZ KAPCSOLÓDÓ ELMÉLETI ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK

Dunai László

egyetemi tanár
BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke
ldunai@epito.bme.hu

Hegedűs István

egyetemi tanár
BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Kollár László P.

egyetemi tanár
BME Tartószerkezeti és Szilárdságtani Tanszék

Lajos Tamás

egyetemi tanár
BME Áramlástan Tanszék

Bevezetés

A dunaújvárosi Pentele híd mederhídjának szerkezeti kialakítása, geometriai mérete, gyártás- és szereléstehnológiai eljárása olyan összetett szerkezeti viselkedést eredményezett, amely a tervezési szabványokat közvetlenül alkalmazó méretezési módszerekkel nem vizsgálható (Horváth et al., 2006). A viselkedés sajátosságainak feltárása és a létesítmény kiemelkedő volta egyaránt szükségessé tett egy sor elméleti és kísérleti vizsgálatot, amelyek elegendő adatot és ismeretet szolgáltatnak a kellően biztonságos, egyszersmind gazdaságos szerkezet megtervezéséhez. Ezeket a vizsgálatokat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) végeztük el az alábbiak szerint:

Az ívstabilitás vizsgálata • lengésvizsgálat • aerodinamikai vizsgálatok • földrengésvizsgálat • stabilitásvizsgálat a beüsztatás állapotában.

Az alábbiakban a felsorolt vizsgálatok alapelveit, módszereit, legfontosabb eredményeit és az ezek alapján levont következtetéseket ismertetjük.

Az ívstabilitás vizsgálata

Az acélszerkezetű mederhíd ún. kosárfül alakú ívpárra kábelekkkel felfüggesztett pályaszerkezet. Az útpálya terhei a pályalemezen és a keresztirányú gerendákon adódnak át az ívek síkjában futó merevítő tartókra, ezeket párhuzamos kábelsorok kapcsolják az ívhez. A kábelek által közvetített terhek az ívek teljes hosszán ívtengely irányú nyomóerőt keltenek, ezzel egyidejűleg jelentős, az ívek különböző szakaszain eltérő nagyságú hajlító nyomaték is fellép.

Az ilyen terhelésű ívek jellemző tönkremeneteli módja a nyomóerő hatására bekövetkező stabilitásvesztés. Egyedül álló ívek, illetve párhuzamos síkokban futó, egymással össze-

kapcsolt ívpárok esetén az ívkihajlás az ívek síkjába eső vagy az ívek síkjára merőleges elmozdulásokkal jön létre. Ezeket a kihajlási formákat a globális stabilitásvesztés „tisztá” formáinak szoktuk nevezni. A kosárfülszerűen elrendezett, egymáshoz támaszkodó ívek az ívstabilitás szempontjából kedvezőbbek a „tisztá” formák valamelyikével kihajló ívekénél, de a stabilitásvesztésük során a „tisztá” formától meglehetősen különböző, ún. „kombinált” globális kihajlási alak jön létre. Az ívkihajlást okozó normálerő, illetve teher nagysága ideálisan rugalmas szerkezet esetén is érzékenyen függ a kihajlási alaktól, ez az érzékenység reális, rugalmas-képlékeny anyagú, lokális stabilitásvesztésre is képes szerkezetnél még inkább fennáll. Ezért a kihajlási jelenség követezéséhez részletes, egyedi vizsgálatra volt szükség. A stabilitás vizsgálatára numerikus és empirikus vizsgálatokból álló programot dolgoztunk ki.

A stabilitásvizsgálat kiinduló gondolata az volt, hogy a szabványos méretezési előírások a reális szerkezeti viselkedést az ideálisan rugalmas anyagúnak tekintett szerkezetekre vonatkozó vizsgálati eredmények korrekciójával, illetve az ideálisan rugalmas szerkezetekre vonatkozó szerkezeti paraméterek alapján levezetett méretezési értékekkel veszik figyelembe. Ha tehát a meglehetősen egyedi kialakítású hídszerkezetet ideálisan rugalmas szerkezetként vizsgálva elő tudjuk állítani a korrigálódó eredmények, illetve a méretezési értékek levezetésére alapul szolgáló szerkezeti paraméterek megfelelőit, ezek alapján a megkövetelt biztonság ellenőrzése tekintetében visszavezethetjük a szerkezet méretezését a szabványok rutinszerű alkalmazására.

A numerikus vizsgálat elsődleges célja ennek megfelelően a globális stabilitásvesztés szempontjából várhatóan kritikus állapotok

meghatározása, a méretezési szabványok kontextusában értelmezhető szerkezeti paraméterek levezetése és a különböző tervezési szabványok által a stabilitásvesztési formákkal szemben megkövetelt biztonság ellenőrzése, illetve összevetése volt. A modellkísérletet azzal a céllal hajtottunk végre, hogy kísérletileg is ellenőrizzük a szabványok előírásai szerint ilyen módon elvégezhető méretezés és ellenőrzés tényleges alkalmasságát.

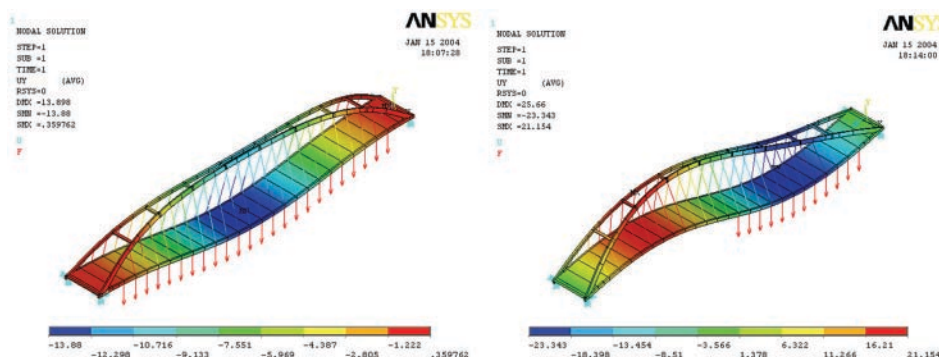
Numerikus vizsgálat

A numerikus vizsgálatok egyik csoportja magára a megtervezendő szerkezetre, a másik pedig a modellkísérlet céljából készült hídmodellre vonatkozó vizsgálat – mintegy a reális anyagú modellvizsgálat numerikus szimulációja – volt. A numerikus szimuláció mind a rugalmas viselkedés, mind a tönkremeneteli módok vizsgálatára kiterjedt.

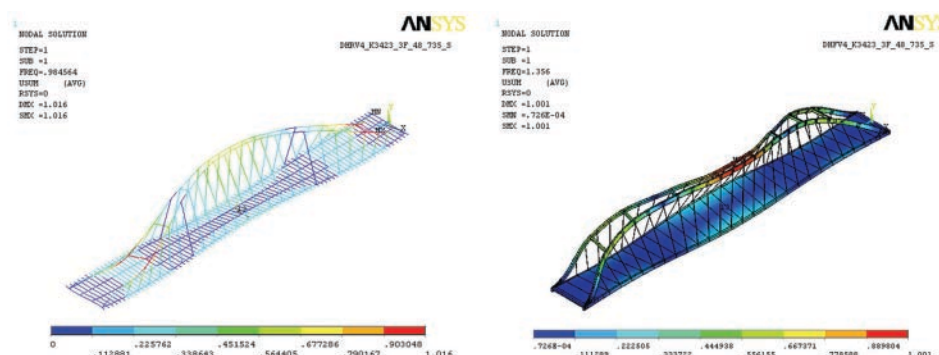
A szerkezet „pontos” vizsgálatát az Ansys programrendszerrel végeztük, ún. felületszerkezeti végeeselemes modell alkalmazásával. A vizsgálat eredményeit az 1. és 2. ábrák szemléltetik. A 3. ábrán a két mértékadó tönkremeneteli módhoz tartozó kísérleti és számított erő–elmozdulás diagramok láthatók. A jó egybeesés a nemlineáris numerikus analízis megbízhatóságát mutatja.

A szerkezet tényleges teherbírására vonatkozóan megkövetelt biztonságot három méretezési szabványt javasolt módszerével, azaz a Magyar Szabvány (MSZ), a Japán Szabvány (JSHB), és a közös európai acélszabvány (Eurocode 3) három módszerével vizsgáltuk totális és féloldalas teher esetén. Az eredményeket az 1. táblázatban foglaljuk össze.

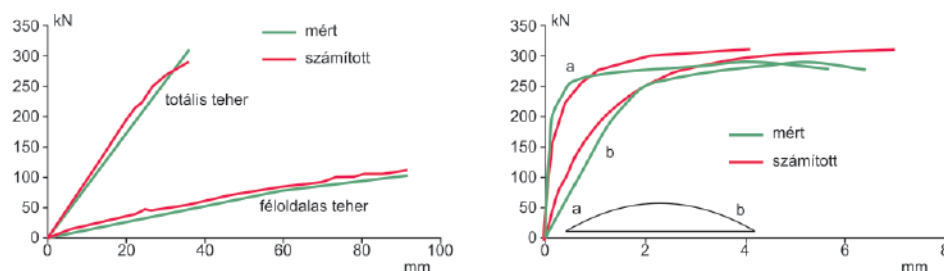
Ha figyelembe vesszük, hogy a híd erőjátékában a kb. 12 000 kN maximális parciális hasznos teher mellett dominál a kb. 90 000 kN nagyságú totális állandó teher hatása, azt



1. ábra • Hídmodell numerikus analízis – lineáris vizsgálat



2. ábra • Hídmodell numerikus analízis – stabilitási vizsgálat



3. ábra • Hídmodell numerikus analízis – nemlineáris vizsgálat

állapíthatjuk meg, hogy a híd méretezésére alkalmazott MSZ-előírások az ív globális tönkremenetelével szemben kielégítő, több mint 2,2-szeres biztonságot nyújtanak (Joó – Dunai, 2005).

Modellkísérlet

A modellkísérletekre a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban került sor (Joó et al., 2005).



4. ábra • Kísérleti hídmodell

A híd és a hídmodell közötti kapcsolatot léptékfüggetlen mechanikai jellemző, a nyomott ív relatív karcsúsága teremtette meg. A mérési rendszert úgy terveztük meg, hogy az ív kihajlási elmozdulásainak mind az ívsíkokba, mind a síkokra merőleges összetevői vizsgálhatók legyenek. A statikai és laboratóriumi adottságok alapján a modell $M=1:34$ méretarányúra adódott, 8991 mm-es hosszal (4. ábra). Az ívek keresztmetszete $100 \times 40 \times 3$ mm-es hegesztett zártszelvény, a merevítő tartók $80 \times 40 \times 3$ mm-es hidegen hajlított zártszelvényű rudak, anyagminőségük S235. A kábelek ekvivalens merevségű sodronykötelekből lettek kialakítva. A modellt a Barabás Kft. gyártotta.

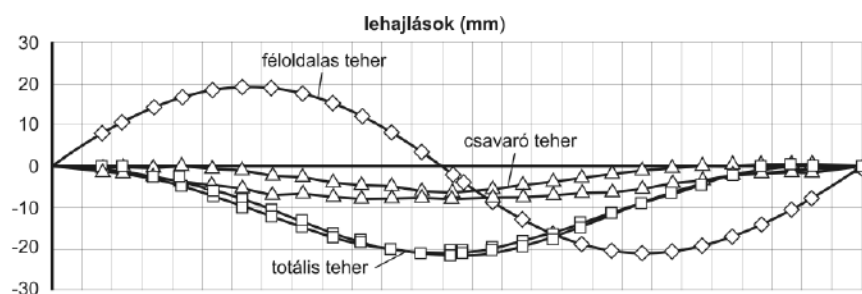
A hídmodell olyan hidraulikus berendezéssel terheljük, amely egy úgynevezett gravitációs teherszimulátor alkalmazásával biztosította, hogy a terhek hatásvonala az alakváltozások során függőleges maradjon. A ter-

helő berendezés lehetőséget adott a hídmodell hossza mentén változó nagyságú és elrendezésű terhek alkalmazására, továbbá a két ív és a két merevítő tartó eltérő terhelésre is (csavaró teher). A hídmodellén 95 pontban mértük a különböző terhelések hatására bekövetkező nyúlásokat, 26-26 pontban a két merevítő tartó lehajlásait és öt pontban az ívek oldalirányú elmozdulásait.

	Totális teher	Féloldalas teher
MSZ	2.25	3.06
JSHB	3.07	3.28
EC3/1	2.20	1.87
EC3/2	1.45	1.84
EC3/3	2.29	2.15

1. táblázat • Ívstabilitási méretezési eljárások biztonsági szintje

Első lépésként – alacsonyabb teherszinteken – olyan méréseket hajtottunk végre,



5. ábra • Hídmodell le hajlási ábrái

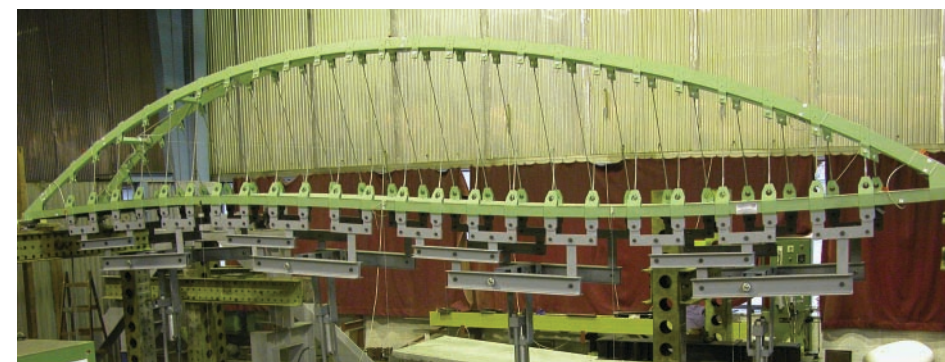
melyek során a szerkezet rugalmas állapotban maradt. A célunk ezekkel az volt, hogy megismerjük a hídmodell viselkedését különböző terhelési viszonyok esetén. Az 5. ábra le hajlási ábrái szemléltetik a szerkezet jellemző viselkedését totális, féloldalas és csavaró jellegű teher esetén. A mérési eredmények igen jó egyezést mutattak a numerikus vizsgálat eredményeivel, és igazolták a számítási eredményekben is megmutatkozó jellegzetességeket: a totális és féloldalas teherrel szembeni ellenállás jelentős eltérést és a csavaró jellegű terhekkel szembeni érzékenységet.

A kísérletek második fázisa a hídmodell teherbírási tönkremeneteli módjának meghatározására irányult, két különböző terhelési mód elemzésével. Totális terhelés esetén a domináns normálerő az ívek síkjára merőleges kihajlást, féloldalas terhelés esetén pedig

a domináns nyomtér síkbeli tönkremenetelt okozott. Először a totális terhelést fokozatosan növeltük, amíg 320 kN-os teljes teherrel az egyik ívégen – a végcsomópont és az első ívát kötés között – megindult az oldalirányú kihajlás (6. ábra). Mivel ez a tönkremeneteli mód nem okozott jelentős károsodást az ívben, lehetőség volt a parciális teher hatására bekövetkező tönkremenetel vizsgálatára is. A tönkremenetel 110 kN parciális teherrel következett be. A kihajlást megelőző alakváltozás másodrendű hatása igen nagy képlékeny deformációkat okozott, ez az ív síkjában bekövetkező ún. határpontos stabilitásvesztést (képlékeny instabilitást) okozott (7. ábra).

Lengésvizsgálat

A szél- és földrengéshatás elemzéséhez fel kell használni a hídszerkezet dinamikai jellemző-



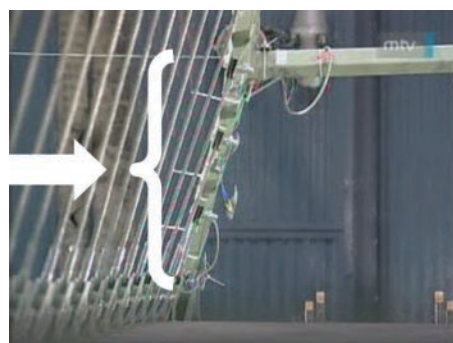
7. ábra • Tönkremenetel – féloldalas teher

it, elsősorban (a kihajlási alakokhoz hasonlóan kombinálódó) összetett szabad lengésalakokat és a hozzájuk tartozó sajátfrekvenciákat. Ehhez olyan „pontos” számítógépi modelleket kellett kifejleszteni, amelyek nagy pontossággal figyelembe tudják venni a híd tömegeloszlását és merevségi viszonyait, illetve olyan „közelítő” számításokat, amelyek rövid futásidővel képesek a nagypontosságú számítási modell által szolgáltatott eredményeket jól közelíteni (Hegedűs – Kovács, 2007).

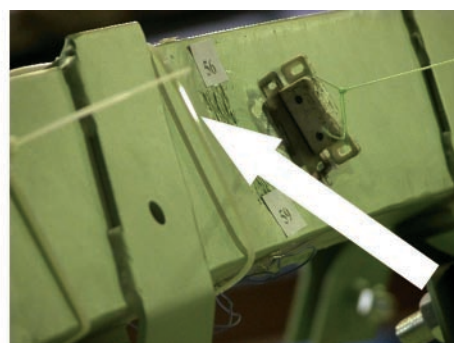
A mederhíd lengésvizsgálatát a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén hajtottuk végre, az aerodinamikai és a földrengésvizsgálatok igényeinek szem előtt tartásával (Joó – Hegedűs, 2005). A numerikus lengésanalízishez a híd általános célú vizsgálatra kifejlesztett felületszerkezet-modelljét és egy ezzel párhuzamosan fejlesztett, elsősorban a szél- és a földrengéstér- vizsgálat igényeinek szem előtt tartásával konstruált rúdszerkezet-modellt alkalmaztunk. A párhuzamos modellfejlesztést az indokolta, hogy a felületszerkezet-modell a szerkezeti részletek és a tömegeloszlás nagy pontosságú figyelembe vételét teszi lehetővé, viszont meglehetősen nagy futtatási időt igényel, míg az egy nagyságrenddel alacsonyabb szabadságfokú rúdszerkezetmodell a „globális” szerkezet viselkedését a „pontos” mo-

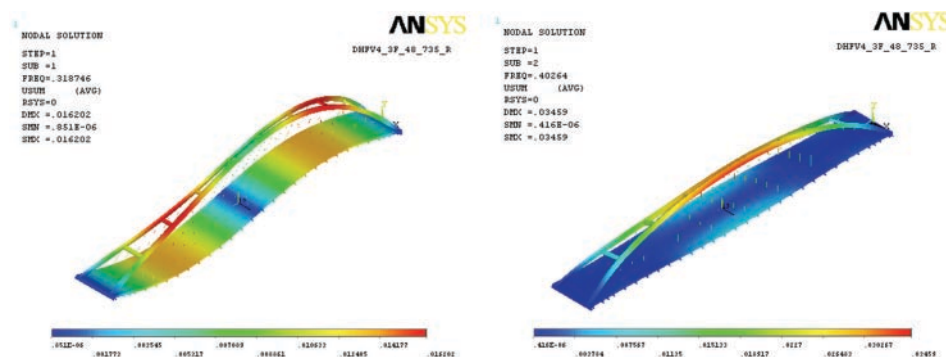
dellhez hasonló megbízhatósággal képes leírni, töredéknyi futtatási idővel. Ez az előny leginkább az időben változó hatások újbóli és újbóli kiszámítását igénylő szélteher-szimulációban érvényesíthető. Mindkét modellel lehetőség volt a szerkezet szabad lengésalakjainak a sajátfrekvenciák növekvő értékei szerinti kirajzolására. Ezek vizsgálata alapján az alábbi megállapítások tehetők.

A hídnak meglehetősen sok egymáshoz közeli sajátfrekvenciájú szabadlengés-alakja van, nemegyes csak a lengésalak tüzetes vizsgálatával különböztethető meg egymástól. Ezt a szerkezet összetettsége magyarázza. Az ívhidaknál a pályaszerkezet egy félhullámú lengéseihez az ívek számottevő hosszváltozása tartozik, míg a két félhullámú lengések az ívek hosszváltozása nélkül is ki tudnak alakulni. Emiatt a pályaszerkezet félhullámú le hajlásával jellemzett lengésalakok nem tartozhatnak a domináns lengésalakok közé. A számítások valóban azt mutatták, hogy a legalacsonyabb sajátfrekvenciához tartozó lengésalak a pályaszerkezet két félhullámú függőleges eltolódásával jellemzett „tisztá hajlási lengés” (8.a ábra). A további sajátlengés-alakok egy része szintén hajlási lengés, de már a második „tisztá hajlási lengés” előtt jelentkezik a szintén két félhullámú, de összetett, az ívek vízszintes

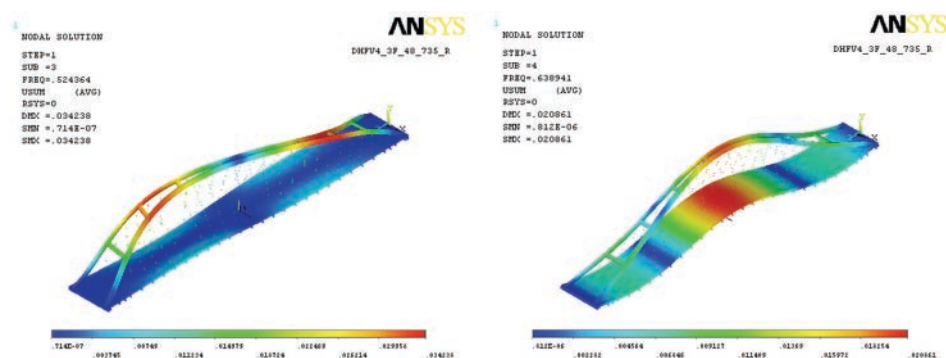


6. ábra • Tönkremenetel – totális teher





8. ábra • Sajátlengésalakok (a) 1, (b) 2



9. ábra • Sajátlengésalakok (a) 3, (b) 4

elmozdulásainak és a pályaszerkezet elcsavarodásainak kombinációjával jellemzett lengésalak. Ez alapvetően a híd súlypontjának és rugalmassági középpontjának eltérő magasságából adódik. A függőleges hajlító lengések azért léphetnek fel tisztán, mert mindkét pont a híd teljes keresztmetszetének szimmetriatengelyében van, a kombinált lengésalakok pedig azért, mert az említett pontokhoz kötődő hatások különböző magasságban működnek.

A híd aerodinamikai stabilitásának vizsgálata szempontjából fontos azoknak a közeli sajátfrekvenciákhoz tartozó lengésalakoknak az ismerete, amelyekhez a pályaszerkezet aerodinamikailag kombinálódó, öngerjesztett hajlító és csavaró lengése (flutter) tartozhat.

Valóban találhatók az első sajátlengésalakok közt ilyenek. Az „első” két félhullámú hajlítási lengéshez közeli frekvenciájú „harmadik” lengésalak (9. b ábra) esetén a pályaszerkezet jó közelítéssel két félhullámú csavaró lengést végez. A két lengésalakhoz tartozó sajátfrekvenciák aránya $\varepsilon=1,645$, ami – szerencsére – magasabb a hasonló keresztmetszetkialakítású gerendahidak problematikus frekvenciaarányánál. Az aerodinamikai kombináció veszélyét vizsgáló modellkísérletek kiinduló adata ezeknek a lengéseknek a sajátfrekvencia-aránya volt.

A lengésvizsgálatban felhasznált kétféle modell eredményei a lengési módusok többségében meggyőző egyezést mutattak. Ez lehe-

tőséget adott arra, hogy a hídtengely-irányú földrengésterhek vizsgálatában – néhány egyszerűsítéssel – ezt a rúdmodellt alkalmazzuk. A rúdmodell pályaszerkezetének vízszintes síkú lengései azonban lényegesen nagyobbak voltak, mint a felületszerkezet-moddellé. Ez azt mutatta, hogy a feszültségek ellenőrzéséhez igazított tartórácsmodell nem képes egyszersmind arra is, hogy a pályalemez tárcsamerevségének hatását a felületszerkezet-moddellhez hasonlóan tükrözze. Ezért a szélteher *time-history* módszerrel történt vizsgálatához egy többletmerevítéssel módosított rúdszerkezeti modellt kellett alkalmazni. Ezt a vizsgálatot a tervező végezte el a SOFiSTiK program szélmoduljának támogatásával.

Az aerodinamikai vizsgálat

A hídszerkezetek szélhatásból adódó terhelőnyada, különösen pedig a dinamikus terhelést jelentő teherhányad a támaszköz növekedésével folyamatosan növekszik. Az aerodinamikai hatások a pályaszerkezet belebegését és a kábelek lengését okozhatják. A belebegés közvetlenül veszélyezteti a híd állékonyságát, a kábellengés gyors anyagfáradást idézhet elő. A szerkezetre ható szélteher nagyságát és rezgőkeltő hatását jelentősen befolyásolják a szerkezeti kialakítás (elsősorban keresztmetszeti alak) finom részletei. A hídszerkezet aerodinamikai viselkedése ezért csak részletes egyedi vizsgálattal tisztázható (Hegedűs, 2005). Ilyen vizsgálat szélcsatornakísérlettel vagy az áramlás numerikus szimulációjával végezhető.

A mederhíd aerodinamikai vizsgálatait a BME Áramlástan Tanszékén végeztük. Mind szélcsatornakísérletekre, mind numerikus vizsgálatra sor került.

Az összetett alakú merevítő tartós ívhídra ható (dinamikus) szélteher alábbi három gerjesztő hatása igényelt részletes vizsgálatot:

- a lökészerű szélesség-változásokhoz tartozó ún. turbulenciagerjesztés,
- a pályaszerkezet örvénygerjesztése,
- a pályaszerkezet önvezérelt lengései.

A felsorolt vizsgálatok az alábbi részfeladatok elvégzését igénylik:

- a pályaszerkezetre és az ívekre ható szélteher eltoló, emelő és elforgató keresztmetszeti eredőinek meghatározása a szélirány függvényében,
- az örvényleválások szélességtől függő frekvenciájának és az örvények által létrehozott felhajtóerő-ingadozás amplitúdójának meghatározása,
- a belebegést okozó kritikus szélesség meghatározása.

A szélcsatorna-vizsgálatok

Az áramlástani vizsgálatokat az Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratóriumában végeztük el a laboratórium vízszintes, recirkulációs rendszerű szélcsatornájában (Goricsán et al., 2005).

Az áramlástani és rugalmassági problémák együttes modellezésének összetettsége miatt ilyen méretű hidaknál nem az egész hídszerkezet rugalmas (aeroelasztikus) fizikai modelljét vizsgálják, hanem a híd egy adott hosszúságú szakaszának modelljét, melynek alakja és mozgásai a valóságos híd dinamikai viselkedését helyesen modellezi. Ez a szerkezet rész esetünkben a pályaszerkezet. Ennek egy reprezentatív szakaszát egy ún. szekciómodell képviselte a vizsgálatban.

Az aprólékos munkával kidolgozott 1:70 léptékű, alumíniumból készült szekciómodell részletesen követi a hídkeresztmetszet geometriáját (10. ábra). A híd tengelyére merőleges síkban ható erőt és nyomatékot négy, a vízszintes erőt a modell két oldalán egy-egy vízszintesen elhelyezett erőmérő cellával mértük

(II. ábra). A nyomásingadozások regisztrálására a modell áramlással párhuzamos szimmetriasíkja közelében, attól egyenlő távolságban felvett két síkban összesen hetvenöt nyomásmérési helyet alakítottunk ki. A modellt kis, 0,5 % turbulenciafokú és az atmoszférikus áramlásnak megfelelő nagyobb (a szakirodalom alapján 5 %) turbulenciájú áramlásban vizsgáltuk. A rögzített állapotban végzett mérésekkel meghatároztuk a széltelher keresztmetszeti eredőit és a pályaszerkezetre ható szélnyomás-eloszlást. A modell forgatásával kimértük a szélirány és az erő- és nyomatéki tényezők kapcsolatát leíró függvény néhány jellemző értékpárját. Az erő- és nyomatéki tényezőket $0, \pm 2^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ megfúvási szögnél határoztuk meg, két különböző turbulenciafok esetén, kerékpárút modellezésével és anélkül. A 75 mérési pontban valamennyi változatnál mértük az időbeni átlagnyomást és a nyomásin-

gadozást. A modell mögött elhelyezett hődrót-anemométerrel mértük a hídról leúszó örvények okozta sebességingadozást. A nyomásingadozás-mérések alapján meghatároztuk az intenzitás hely szerinti változását, a hídlengést gerjesztő nyomásingadozások frekvenciáját és amplitúdóját.

Mivel a híd keresztmetszete az áramlási határreteg leválását előidéző „éles” elemekből áll, a szekciómodell és a tényleges szerkezet körüli áramlás a Reynolds-féle szám különbsége ellenére hasonló. Ezért a rögzített helyzetű szekciómodellen mért nyomásingadozások közvetlenül felhasználhatók a pályaszerkezetet érő örvénygerjesztés vizsgálatánál.

Az aeroelasztikus hatások vizsgálatához a szekciómodell rugalmas felfüggesztésével biztosítani kellett a modell két szabadságú szabadlengését. A valóságos híd nem modellezett részének hatását modellező rugalmas felfüg-

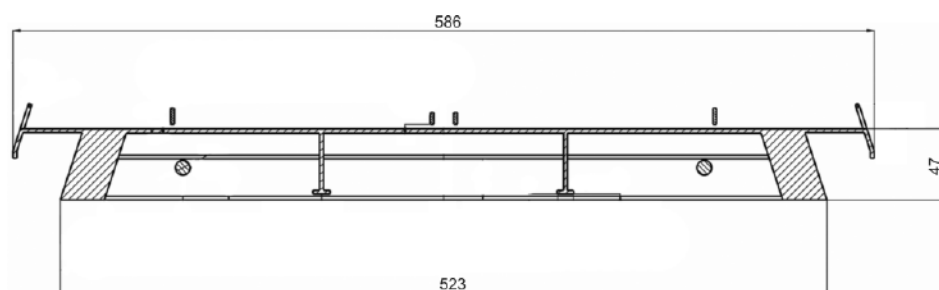
gesztést lemezugókkal oldottuk meg, ezek a translációs lengést és a modell hossztengele körüli forgó lengést biztosították. A két lengés frekvenciájának arányát a felfüggesztés torziós lengés frekvenciáját befolyásoló távolságának változtatásával állítottuk be. Ily módon el lehetett érni, hogy ez az arány azonos legyen a pályaszerkezet hajlító és csavaró lengésével bekövetkező aeroelasztikus stabilitásvesztésben kombinálódó két lengésalak sajátfrekvenciájának arányával. A szekciómodell mozgását a modell felső lapjának négy sarkában elhelyezett gyorsulásérzékelők mérték. Ez a modell a modelltörvényekből adódó túlhatározottság miatt nem volt alkalmas a hídra ható szél kritikus értékének a közvetlen kimérésére, de lehetőséget adott, hogy kísérleti úton meghatározzuk a zérus vastagságú sík keresztmetszethez tartozó elméleti kritikus sebesség és a keresztmetszeti kialakítás által módosított kritikus sebesség hányadosát.

A szélcsatorna-vizsgálatot kis áramlási sebességeknél (2 m/s) kezdtük, majd lépcsősen növeltük a sebességet. Ennek hatására a mo-

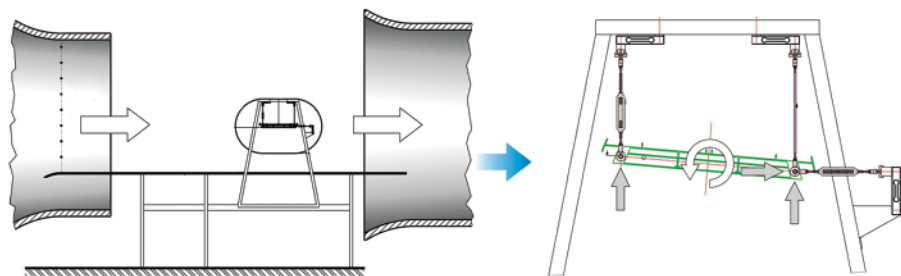
dell több alkalommal nagy amplitúdójú flutter lengésbe kezdett (12. ábra). A különböző sebességeknél felvett rezgéseképek és spektrumok azt mutatták, hogy 9,9 m/s érték tekinthető a modell kritikus sebességének. Ezt összehasonlítva a szakirodalomból ismert alapgátlással, a kritikus sebességek hányadosa $\eta = v_{krit}/v_{kritsz} = 0,545$ értékre adódott. Az elterjedten alkalmazott Klöppel–Thiele-féle szakirodalmi ajánlás a vizsgált hídalak esetén erre a hányadosra – a híd magasságának a szélességéhez viszonyított aránya, illetve a csavaró és hajlító lengések aránya alapján – hozzávetőleg $\eta = 0,58$ értéket javasol. A kísérletek eredményeiből megállapítható, hogy ez a fél-empirikus módszer alkalmas az adott hídnál a kritikus sebesség meghatározására.

Numerikus vizsgálat

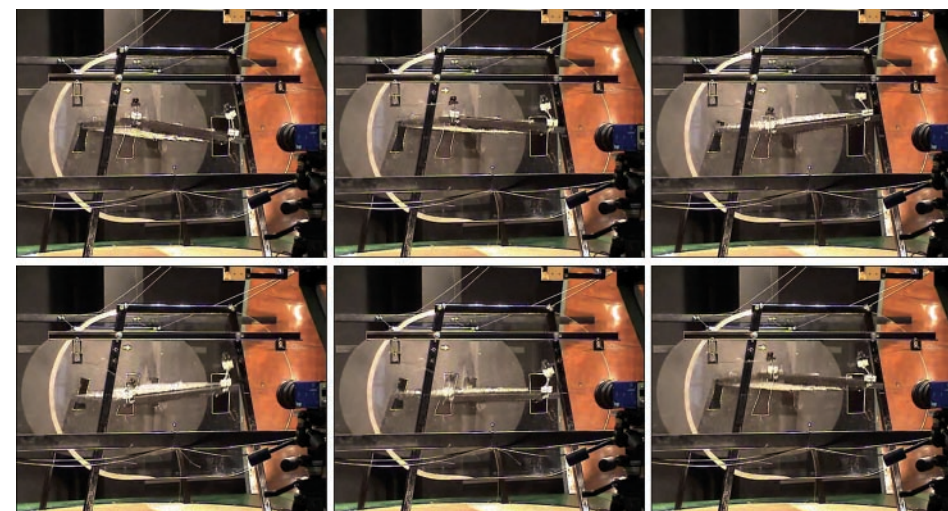
A fent ismertetett mérési program mellett a Fluent 6.1.22 szoftverrel elvégeztük a híd körüli áramlás nagyörvény (large eddy) szimulációját is. Ez a számítás lehetőséget adott arra, hogy feltárjuk a híd körüli áramlás részleteit,



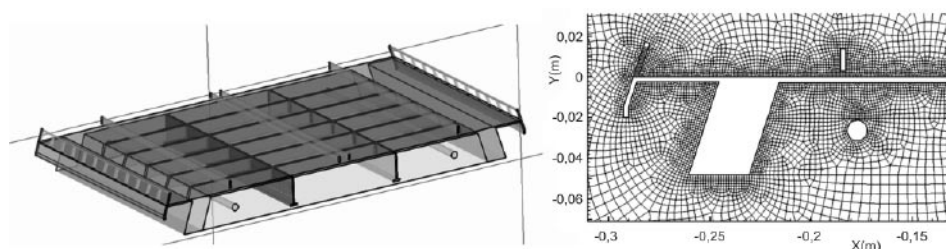
10. ábra • Szélcsatorna-szekciómodell



11. ábra • Szélcsatorna kísérleti elrendezés



12. ábra • Szélcsatorna-szekciómodell lengése



13. ábra • Numerikus szekciómodell

a periodikus lengéseket okozó örvények keletkezésének helyét és mozgásuk jellemzőit (Lohász – Lajos, 2005). A numerikus modell kialakítása során a szélsatorna-kísérletekben használt 1:70 léptékű szekciómodell egy „szeletét” képeztük le, a számítási tartományt a körüláramlásokra elfogadott irányelvek alap-

ján választottuk meg (13. ábra). A számítást egyenletes sebességmegoszlással indítva, adott időlépésekben hajtottuk végre. A szimuláció jelentős számítógépi háttérrel követelt (tíz perc „real time” hosszúságú folyamathoz háromprocesszoros párhuzamos számítás segítségével három hét futási idő). A numerikus szimulá-

ció eredményeit a mérési eredményekkel összevetettük. Megállapítottuk: (a.) a hídmodell felső részén a megfúvási sebesség csak kisebb mértékben befolyásolja az alaki tényező értékét, a számítási eredmények igen jól közelítik a mért értékeket, beleértve a szalagkorlátok által okozott helyi nyomásváltozásokat is, (b.) a híd alsó részének mintegy negyedén a számított és a mért értékek között nagyobb különbségek adódtak. Mindkét kerékpárút alatt és a főtartók alsó felületén is igen jó egyezést tapasztaltunk. Jó egyezést adott a mérésekkel a numerikus szimuláció a hídmodellről leváló örvények frekvenciája és amplitúdója tekintetében is. Összességében megállapítottuk, hogy az áramlás nagy örvény módszerrel végzett numerikus szimulációjával a jelenség megfelelő pontossággal elemezhető.

A numerikus modell alkalmazásával további szimulációkat hajtottunk végre, amelyekkel a szerkezeti kialakítás okozta áramlási viszonyok – a mérési vizsgálatokon túlmenően is – vizsgálhatók voltak (14. ábra). A numerikus szimuláció eredményeként kapott „filmekből” kitűnt, hogy a híd alsó része alatt viszonylag nagy, de nem nagyon intenzív örvények keletkeznek, amelyek közel periodikusan mozognak, de a modell alsó felületétől viszonylag nagy távolságban vannak, így a nyomás változásából származó periodikusan ingadozó erő amplitúdója nem túl jelentős.

Földréngészvizsgálat

A földréngészvizsgálatot a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén és a Tartószerkezeti és Szilárdságtani Tanszékén végeztük (Vigh et al., 2006a). A híd tervezésének idején Magyarországon földréngészvizsgálatra vonatkozó szabvány nem volt érvényben. Az útiügyi előírás úgy rendelkezett, hogy a földréngész hatását „a szakma elismert szabályai szerint figyelembe

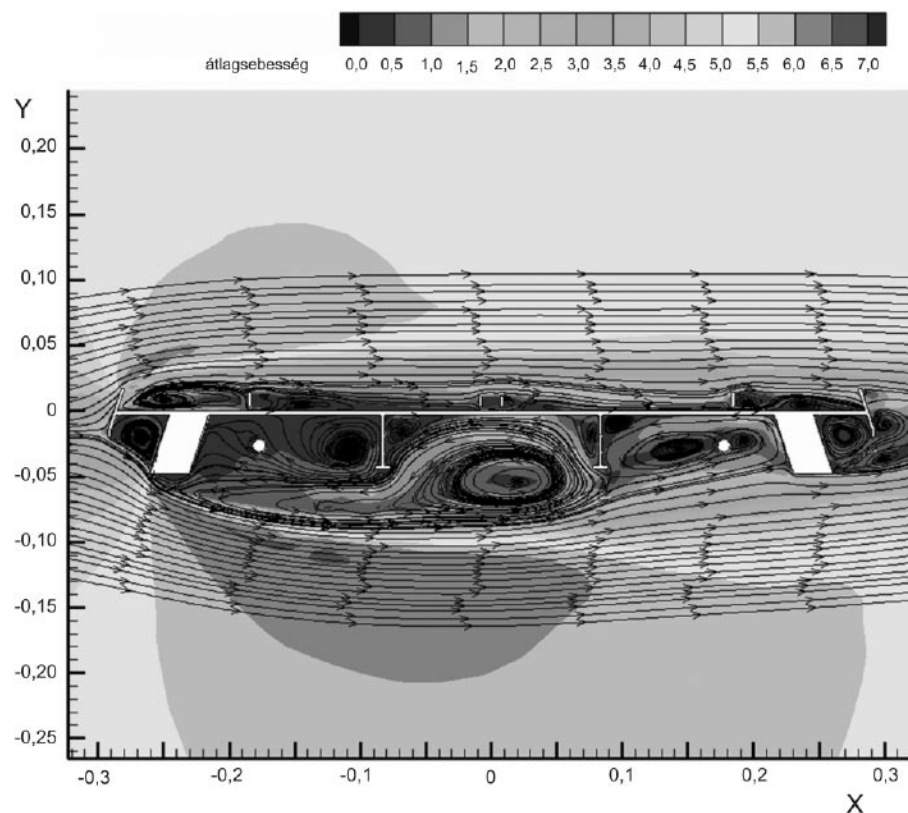
kell venni”. Ezért a vonatkozó Eurocode 8 aktuális – még hivatalosan nem kiadott – változatának irányelveit követtük a vizsgálatok végrehajtása során. Az Eurocode-hoz az ún. *Nemzeti Melléklet* sem állt rendelkezésre, amely többek között a figyelembe veendő talajgyorsulásról intézkedik. Ezért a korábban kiadott *Nemzeti Alkalmazási Dokumentum*-ban adott értékeket vettük figyelembe. A hazai szeizmikus kutatások szerint, a Pentele híd helyén várható földrengés talajgyorsulása 0,08 g, azaz a nehézségi gyorsulás 8 %-a.

A teljes hídszerkezet – a két ártéri hídszakas és a mederhíd – földrengéssel szembeni biztonságát ezen alapgyorsulás feltételezésével kellett meghatározni.

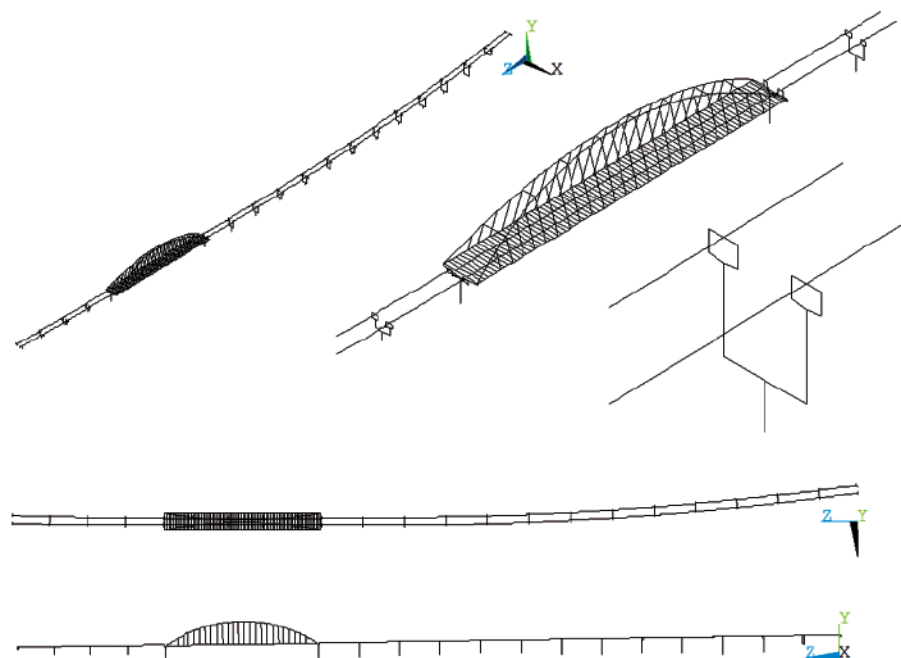
A földréngészvizsgálat módszere és kiindulási adatai

A földréngészszámítás a válaszspektrum analízisre épül, amelynek lényege, hogy a szerkezet igénybevételeit csak a domináns (jellemző) rezgésalakokban határozzák meg, és a méretezést ezen igénybevételek megfelelő összegzésével számítják. A méretezéshez szükséges legfontosabb adatok a jellemző maximális talajgyorsulás és az ún. válaszspektrumgörbe.

A hidak esetleges képlékenyedését úgy lehet figyelembe venni, hogy a földréngési teher értékét az ún. viselkedési tényezővel redukáljuk. A hidak tervezését vagy „duktilis”, vagy „korlátozottan duktilis/lényegében rugalmas” alapon kell elvégezni. Az előbbi esetben a tervezés során a keresztmetszeteket úgy kell kialakítani, hogy a képlékeny csuklók a feltételezett helyeken alakuljanak ki. Jelen híd tervezése rugalmas méretezési elv alapján történt, tehát nem vizsgáltuk a képlékeny csuklók kialakulását, ezért a „korlátozottan duktilis/lényegében rugalmas” számítást szabad alkalmazni. Ebben az esetben a visel-



14. ábra • Numerikus szekciómodell-szimuláció eredményei



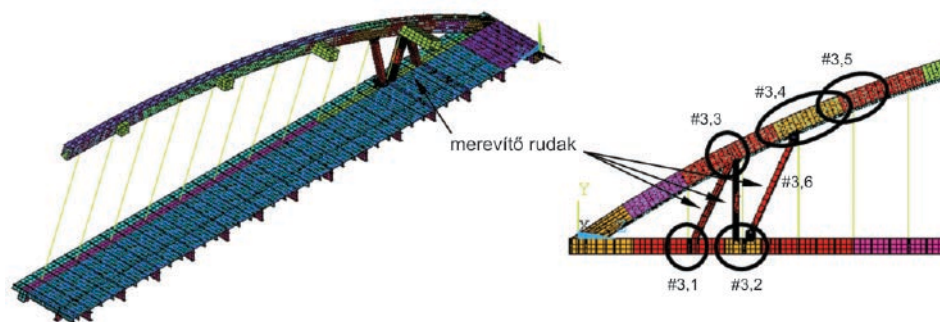
15. ábra • Földrengésvizsgálati hídmodell

kedési tényező maximális értéke 1,5, ezt vettük figyelembe a számításban.

Az alapgyorsulás értékét a híd fontossági osztálya függvényében egy 0,85 és 1,3 között változó tényezővel kell megszorozni. A Duna magyarországi szakaszán jelenleg nincs egyetlen híd sem, amelyet földrengésre méreteztek volna, ezért a Pentele híd fontosságát „átlag

felettinek” tekintettük, és a talajgyorsulást a $\gamma_1 = 1,3$ fontossági tényezővel megszoroztuk.

A válaszspektrum görbéi elsősorban a talajosztálytól függenek. Az Eurocode vízszintes rezgéshez minden talajosztályra kétféle típusú válaszspektrumgörbét ad. A vizsgálat során – a biztonság javára tett közelítésként – ezek burkolóit használtuk.



16. ábra • Globális végeleemes modell – szerelési állapot

A földrengésvizsgálat végrehajtása, eredményeinek értékelése

A hidat térbeli rúdmodellel vizsgáltuk az Ansys végeleemes program segítségével. A párhuzamosan futó két ártéri hidat két elkülönülő gerendasorral modelleztük (15. ábra). Az ártéri hidak folytatólagos többtámaszú tartók, amelyek azonban kölcsönhatásban állnak egymással az alul összefogott pillérek miatt, és a közös mederpilléreken keresztül össze vannak kötve a mederhíddal is. Ez szükségessé tette a teljes hídsorozat együttes vizsgálatát. A konvergenciavizsgálat szerint hozzávetőlegesen 3400 csomópont alkalmazása kielégítő pontosságú eredményt szolgáltat.

A számítások szerint a globális teherviselő elemek méretezésében, a függőleges irányú földrengéskomponens szerepe elhanyagolható, a keresztirányú földrengéskomponens szerepe kicsi de a tengelyirányú (vízszintes) földrengéskomponensnek domináns hatása van (Vigh et al., 2006b).

A földrengés figyelembevételével a szerkezetek fő igénybevételei (és a keresztirányú sarureakciók) csak kis mértékben (20–30 %kal) adódnak nagyobbra, mint a gyakori terhecsoportosítások során számításba vett terhekből eredők. A hosszirányú sarukon viszont a földrengési teher esetén a földrengéstéher figyelembevétele nélkül számított sarureakció két-háromszorosa is ébred, amely természetesen jelentős feszültségnövekedést jelent a saru környezetében is.

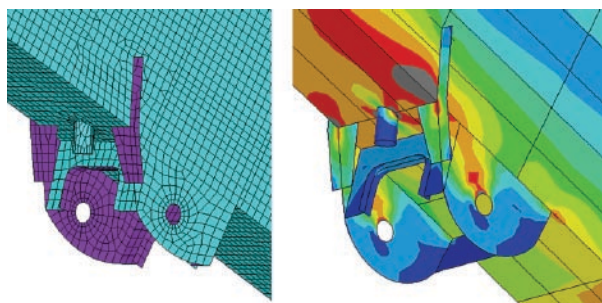
Globális és lokális stabilitásvizsgálat a beúsztatás állapotában

A mederhíd szerelését a parton végezték, majd nagy teherbírású bárkák segítségével úszatták be a hídpillérek közé. Ebben az állapotban a bárkák nem a végleges támaszain, hanem a

merevítő tartók közbelső szakaszain támasztották alá a hidat. A teherviselésbe feltétlenül be kellett vonni az ívszerkezetet. Ezt ideiglenes összekötő rudak segítségével lehetett elérni, ami a végleges állapottól lényegesen eltérő erőjátékot eredményezett az egész szerkezeten (Horváth – Nagy, 2008). Különösen kedvezőtlen a változás az ideiglenes erőbevezetések által érintett gerenda- és ívszakaszokon, ahol csaknem az úsztatott összsúly (87 000 kN) egynegyede adódik át. Az igénybevételek elviseléséhez itt erőteljes helyi megerősítésre volt szükség, továbbá merevítő bordázatot kellett kialakítani az acéllemezekből összetett tartószerkezetek lokális horpadásainak megakadályozására. Ezek megtervezéséhez nagy pontosságú számítógépi modelleken alapuló vizsgálatokkal kellett végrehajtani. A vizsgálatokat a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén végeztük (Dunai, 2006).

A végeleemes modell és igénybevétel-számítás

Az úsztatott hídszerkezet globális vizsgálatára alkalmazott felületszerkezeti végeleemes modell (16. ábra) megfelelő pontossággal tudta követni a szerelési terhek teljes szerkezetre kifejtett hatását, de az erőbevezetések lokális hatásának vizsgálatára a modellt pontosítani kellett. Ennek érdekében a leginkább érintett öt szerkezeti részletre a globális modelből származtatott nagyobb felbontású lokális modellt dolgoztunk ki az Ansys végeleemes program alkalmazásával. A lokális modelleket a globális modellen végrehajtott vizsgálat alapján felvett kinematikai terhekkel illesztettük a globális modellhez. A 17.a ábrán az ív és az ideiglenes összekötő rúd csatlakozásának lokális modellje látható. A 17.b ábra a lokális modellel meghatározott, jelentős csúcsokat tartalmazó feszültségeloszlásokat mutatja.



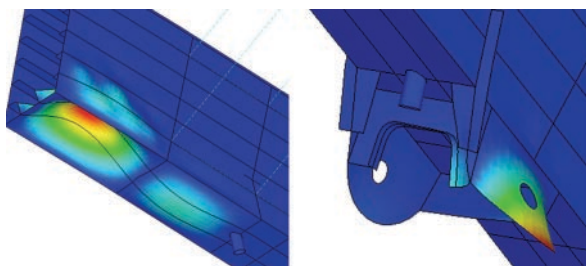
17. ábra • Ívcsomópont (a.) lokális végelemes modellje, (b.) feszültségeloszlása

Stabilitásvizsgálatok

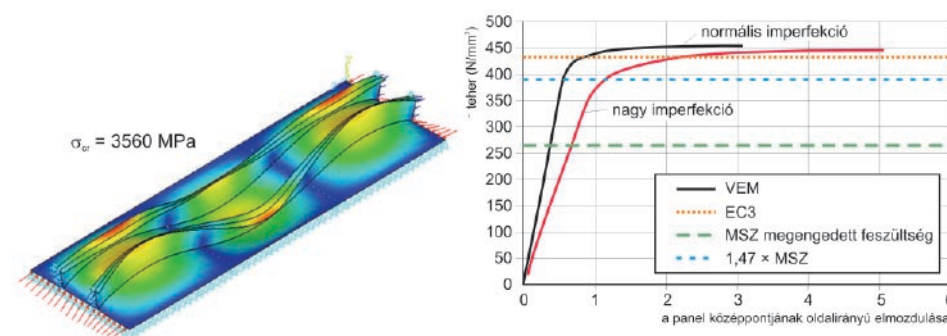
A szerkezet globális stabilitási vizsgálata szerint az ívkihajlás az úsztatási állapotban nem okoz problémát, viszont az ívek és merevítő tartók keresztmetszeteit alkotó lemezek horpadási teherbírása az erőbevezetések környezetében nem elegendő.

A lokális merevítéshez alkalmazott merevítő elemek stabilitásának ellenőrzése a szabálytalan alak és az összetett feszültségeloszlás következtében egyedi vizsgálatokat igényelt. A vizsgálatokat nagypontosságú végelemes modelleken végzett numerikus instabilitási analízis kritikus feszültségei és az imperfekciók szabványos – MSZ és Eurocode – figyelembe vételével végeztük el (18. ábra). Az eredmények azt mutatták, hogy bizonyos mértékadó merevített lemezmezők kihasználtsága a megerősítés ellenére is igen magas, a 100 %-ot is meghaladó. Az alkalmazott eljárás

rások verifikációjára, illetve a mértékadó lemezmezők horpadási teherbírásának megnyugtató megállapítására hat különböző geometriájú és kialakítású merevített lemezmezőt számítógépi szimulációval vizsgáltunk meg, azaz ún. virtuális kísérleteket hajtottunk végre. A vizsgálatok eredményeként kapott nemlineáris nyomóerő–elmozdulás diagramokból megállapítható volt a szerkezet teherbírás tartaléka és imperfekció-érzékenysége (19. ábra). A virtuális kísérletek azt is megmutatták, hogy mekkora a különböző szabványos eljárások biztonsági szintje. Az átfogó vizsgálatok igazolták, hogy a merevített lemezmezők a szerelési terhek hatására fellépő nagyintenzitású és összetett eloszlású igénybevételeket megfelelő biztonsággal, maradék deformációk nélkül fel tudják venni. Amikor a mederhidat a bárkák leemelték ideiglenes támaszairól, a merevítő elemek sértetlensége alátámasztotta a számításokat.



18. ábra • Lemezmezők instabilitási analízise



19. ábra • Merevített lemezmező virtuális kísérleti vizsgálata

Kulcsszavak: függesztett ívhíd, modellkísérlet, lengés, aerodinamika, földrengési ellenállás

IRODALOM

- Dunai László (2006): *Advanced Stability Analysis and Design of a New Danube Arch Bridge*. 6th European Solid Mechanics Conference; Budapest, Hungary, Extended Abstract, p. 2, CD
- Goricsán István – Balczó M. – Lajos T. (2005): *A dunaújvárosi Duna-híd aerodinamikai vizsgálata: szélcsatorna-kísérlet*. BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei, Budapest, 65–76.
- Hegedűs István (2005): *Nagyáramszelvényű ívhidak tervezésének a szélterheléssel kapcsolatos kérdései*. BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei, Budapest, 41–56.
- Hegedűs István – Kovács Imre (2007): *A szél dinamikus hatásának vizsgálata*. Elhangzott az MTA-n, 2007. május 10-én, a *Hídszerkezetek (A tudománytól a megvalósulásig)* című tudományos ülésen.
- Horváth Adrián – Nagy Zsolt (2008): *A dunaújvárosi Pentele híd tervezése*. Magyar Tudomány. 4
- Horváth Adrián – Dunai L. – Nagy Zs. (2006): *Dunaújváros Danube Bridge: Construction, Design and Research*. Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). 16, 1, 31–35.
- Joó Attila László – Hegedűs István (2005): *A dunaújvárosi Duna-híd lengésvizsgálata*. BME Hidak és Szerkezetek Tsz. Tud. Közleményei. Bp., 57–64.
- Joó Attila László – Dunai László (2005): *Strength of an Arch Bridge Model: Experiment and Design Methods*. In: Hoffmeister, Benno – Hechler, Oliver (eds.): *Proceedings of the 4th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel '05)*. Maastricht, The Netherlands. Druck und Verlaghaus Mainz Publisher, Vol. B, 4.7-49–4.7-56.
- Joó Attila László – Dunai L. – Kálló M. – Kaltenbach L. – Köröndi L. (2005): *Experimental Analysis of a Nielsen-type Bridge Model*. Materials Engineering, 12, 1, 1–6.
- Lohász Máté Márton – Lajos Tamás (2005): *Híd metszet áramlási vizsgálat nagy-örvény szimulációval*. BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei. Budapest, 77–86.
- Vigh László Gergely – Dunai L. – Kollár L. (2006a): *Numerical and Design Considerations of Earthquake Resistant Design of two Danube Bridges*. 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES 2006, A Joint Event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), Geneva, Switzerland, ID 1420 /1–10.
- Vigh László Gergely – Dunai L. – Kollár L. (2006b): *Experiences on the Earthquake Resistant Design of Two Danube Bridges*. IABSE Symposium, Budapest, Hungary, Report, Vol. 92, IABSE Publisher, 456–457, CD 8 pages

A DUNAÚJVÁROSI PENTELE HÍD TERVEZÉSE

Horváth Adrián

szerkezettervezési igazgató
hid@fomterv.hu

Nagy Zsolt

acélszerkezeti szakfőmérnök
FŐMTERV Zrt.

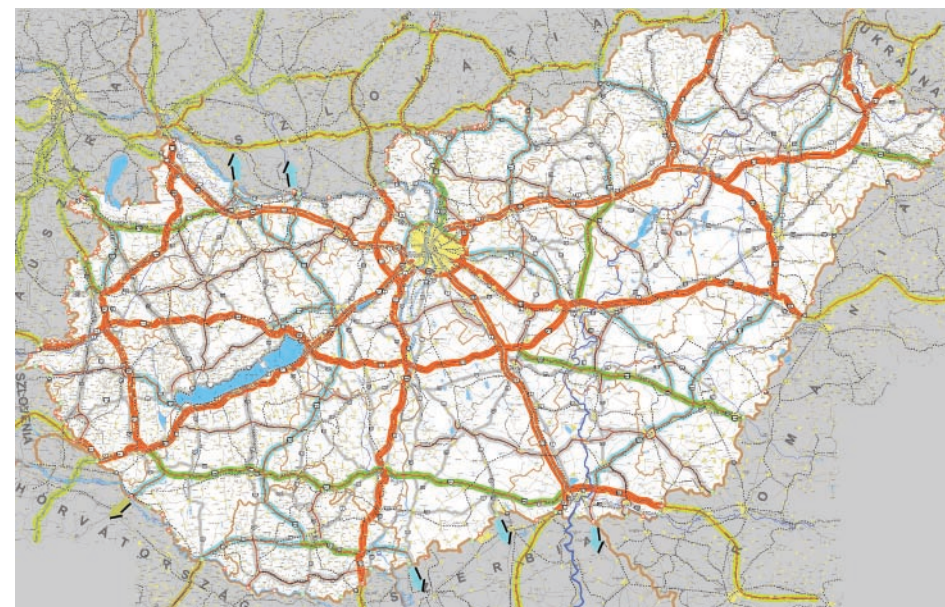
Bevezetés

A Nemzeti Autópálya Zrt. pályázatot írt ki a dunaújvárosi Duna-híd engedélyezési tervének elkészítésére, melyet a FŐMTERV Fővárosi Mérnöki Tervező Részvénytársaság nyert meg alternatív ajánlatával. A kiviteli terveket, majd – a kivitelezői közbeszerzési eljárás után, annak nyertese, a Vegyész Zrt. és a Hídépítő Zrt. alkotta DunaÚJ-HÍD Konzorcium megbízására – a gyártási terveket szintén a FŐMTERV Zrt. készítette. A mederhíd tervezését a BME kísérleti, kutatói és szakértői munkája segítette, az ártéri hidak felszerkezetét – a FŐMTERV Zrt. megbízásából – altervezője, a Pont-TERV Rt. tervezte. A mederhíd kiviteli terveinek kijelölt független ellenőrei a pozsonyi Szlovák Műszaki Egyetem (SUT Bratislava) Építőmérnöki Karának dr. Agócs Zoltán vezette munkatársai voltak, akik tanácsaikkal is segítették a tervezést.

A dunaújvárosi Duna-híd az M8-as autópályát vezeti át a Duna-folyó és annak ártere fölött. A Veszprém–Kecskemét M8-as autópálya-szakasz, elkészülte után, az M0-s nyugati szakasza mai forgalmának 40 %-át veheti át, a híd jelentősége azonban ennél sokkal nagyobb: az észak–dél irányú európai VI-V/CT tengely és a nyugat–keleti irányú TEN-folyosó Pó-síkságtól (Genova)–Milánó–Grác–Dunaújváros–Nagyvárad–Brassó–Bukaresten át Constanzáig (Fekete-tenger) tartó európai közúthálózati elemének csomópontjában épült (1. ábra). Az előző években az új autópályák nyomvonalán (például: M0 budai szakasza, M8 megépült szakaszai 8-as út néven) fél szélességben, kétszer kétsávos autóútként épültek meg az új utak. A híd megépítését megelőzően sokéves térségfejlesztési és gazdasági megtérülést elemző vizsgálati munka folyt, amelynek eredményei azt mutatták, hogy az M8-s autópálya M6–51-es út közötti szakaszát azonnal teljes szélességben célszerű megépíteni, majd rögtön ezt követően ki kell építeni a Veszprém–M6-os Dunaújváros szakaszt és az 51-es út–Kecskemét–Szolnok szakaszt. Az autópálya ott – a később megépíteni tervezett – M4-es autópályához fog csatlakozni. Osztrák és román szomszédaink ezeket a fejlesztéseket figyelembe véve fejlesztik saját úthálózatukat, és egyre sürgetőbben várják a magyar oldali befejezést.

A híd helyének meghatározása

Az M8-as autópálya helyét több helyen keresték. A meglévő országos közúthálózat szerkezetét figyelembe véve a Rácalmás–Dunaújváros közötti nyomvonal lett volna a leg-



1. ábra • Magyarország tervezett gyorsforgalmi főúthálózata

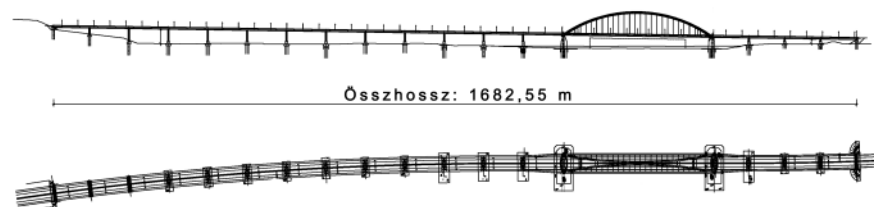
kalmasabb. Dunaújvárostól északra azonban Rácalmásig nem találtak a tervezők konfliktusmentes folyosót. Az üdülőkkel sűrűn beépített, természetvédelmi területen áthaladó úttal szemben teljes társadalmi elzárkózás bontakozott ki.

A Dunaújvárostól jóval délebbre, Apostag és Dunaegyháza között vizsgált nyomvonal a dunaföldvári híd és az 52. számú főút közelsége miatt nem hozta volna azokat a külső hatásokat, amelyek a beruházást nemzetgazdasági szinten hatékonytá tették volna.

Harmadikként maradt a két fenti nyomvonalváltozat közötti lehetőség: a Dunavecse és Apostag közötti átvezetés. E nyomvonal társadalmi elfogadtatása sem volt egyszerű. A Kiskunsági Nemzeti Parkot keresztezni a legszigorúbb és legkeményebb környezetvédelmi előírások betartásával sem lesz egyszerű.

A Pesti-síkság és a Mezőföld löszplatója mintegy 50 m-es szintkülönbséggel, meredeken lezszakadó löszfalban találkozik a területen.

A megfelelő hossz-szelvény kialakíthatósága, továbbá a lösztalaj sajátos szerkezeti tulajdonságaiból adódó talajmechanikai szempontok szükségessé tették, hogy a nyomvonal lehetőség szerint természetes eróziós völgyben érje el a platót. A lehetséges kivezetési pontok mellett további kötöttséget jelentett a Duna fölött átfeszített 120 kV-os nagyfeszültségű távvezeték nyomvonala. Az egyeztetések során tisztázódott, hogy annak kiváltásával reálisan nem lehet számolni, így azt mind a vonalvezetés, mind a szerkezetválasztás során adottságként kellett kezelni. A bal parton a nagyfeszültségű vezeték mellett két település, Dunavecse és Apostag határvonalát kellett figyelembe venni a helyszínrajzi tervezéskor. A tanulmánytervi nyomvonalat mindezek miatt módosítva, a tervezett út a kisapostagi vízfolyáson levő tavat délről kikerülve, egy természetes eróziós völgyben éri el a partfalat, majd a 120 kV-os vezeték kilengését és előírt védőtávolságát figyelembe véve 7000 m suga-



2. ábra • A Pentele híd hosszszelvénye és felülnézete

rú jobb ívvel halad át a rekultivált szeméttelp, feltöltött zagytér, majd az Apostagi-sziget felett. (2. ábra) A mederhídhoz átmeneti ívvel csatlakozva a folyamot egyenes tengellyel keresztezi, majd azonos sugarú bal ívvel csatlakozik a településhatárhoz igazodó bal parti nyomvonalhoz.

A híd magassági vonalvezetését az építéstechnológia és a gazdaságosság szempontjai alapján határoztuk meg. A jobb parti 1 km-es hídhosszból és az autópálya szélességéből adódó építési feladat mértéke alapján egyértelmű volt, hogy ezt az ártéri felszerkezetet a Duna-meder fölől szerelve, szakaszos előretolással célszerű megépíteni. A löszfal pereménél a nyomvonal keresztezi az iránytöréssel továbbhaladó nagyfeszültségű vezetékét. Az építési és végleges állapotban biztonsági okokból egyaránt szükséges védőtávolság miatt mintegy 10 m-es bevágás létesítése volt indokolt, melynek optimumát egyrészt a csatlakozó ártéri híd pilléreinek magassága, másrészt a löszterület talajmechanikai adottságai szabták meg. Így alakult ki az állandó 1,46 %-os emelkedésű hosszszelvény. A bal parton, hogy az árterületet ne szűkítsük, a hídfő az árvédelmi töltés mögé, a mentett oldalra épült. Az árvédelmi töltés tetején lehetővé kell tenni munkagépek zavartalan közlekedését, az árvízi védekezést, illetve a töltés fenntartási munkáit, ezért a híd alsó éle kb. 4,50 m-rel a töltés síkja fölött halad. Ez a még elfogadható legki-

sebb magassági méret határozta meg ezen a parton a pillérek és a hídhoz csatlakozó töltés magasságát. A híd teljes hossza 1682,55 m.

Az ártéri hidak 7000 m sugarú vízszintes ívben fekszenek, átmeneti ívvel csatlakozva az egyenes tengelyű mederhídhoz.

A szerkezet megválasztása

A tervezéssel párhuzamosan történtek meg a VITUKI-ban a folyó hidrológiai vizsgálatai. Az érintett folyamszakaszon már korábban elvégzett mederrendezés eredményeképpen a szabályozott Duna mederszélessége mintegy 450 m lesz, a nyomvonaltól délre levő gát és párhuzammű által határolt területen a meder feltöltődése évek óta zajlik. Mindezeket mint alapadatokat figyelembe véve a mederpillérek tengelytávolságát 312 m-re választottuk. A középvízi part és a mederpillérek között így elegendő távolság maradt az uszadék- és jégmozgás, illetve a parti hajózás részére, a választott távolság ugyanakkor lehetővé tette, hogy a pilléreket TS-uszályokból kialakított bejáróhídról építsék meg. A mederhíd így megválasztott 307,9 m-es támaszközével a folyó két oldalán működő, illetve tervezett kikötők hajóforgalma a kivitelezés alatt és a későbbiekben egyaránt zavartalan lehet.

Ebben a nyílástartományban két szerkezetípus versenyez egymással: a ferdekábeles hidak¹ (3. ábra) – Oszakában is ilyen szerkezetet választottak a 300 m-nél nagyobb nyí-

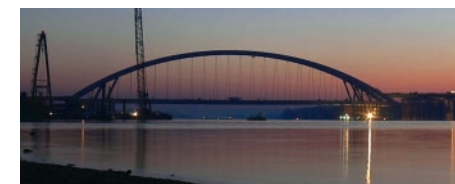


3. ábra • Ferdekábeles híd
Alex Fraser híd a Fraser-folyó fölött,
British Columbia, Kanada

lásokhoz – és a kosárfül elrendezésű ívhidak (4. ábra). Évezredek óta építenek boltozott szerkezeteket kőből és több mint száz éve hasonló erőjátékú ívhidakat vasból, acélból, vasbetonból. A döntően nyomott ívszerkezet előnyös tulajdonságai ellensúlyozták a kivitelezési nehézségeket, és kényelmetlenségeket, amelyeket leginkább az építkezés helyszínén szükséges állványrendszer okoz. Ilyen szerkezet például az 1963-ban épült Fehmarnsundbrücke a tenger fölött és a Van Brienenoord híd Rotterdamnál, a Maas-folyó torkolatában (1965). Az 1960-as évek közepén viszont egy kiváló új szerkezet és építéstechnológia jelent meg, a támaszaitól két irányba szerelt, oszlop(ok)ra kábelekkel közben felfüggesztett gerendahíd, az ún. ferdekábeles híd (Leverkuseni híd, 1965; Maxau híd, 1966). Ezek a szerkezetek a nagyobb nyílástartományokból kiszorították az ívhidakat. Hollandiában viszont szűknek bizonyult a fent említett rotterdami ívhíd, és 1986–90 között azonos szerkezeti rendszerű hidat építettek mellé. Ezt más helyszínen – Zwijndrechtben – szerelték össze, s a 4800 tonnás szerkezetet egyben, hajók fedélzetén úsztatták végleges helyére.

A Pentele híd nyomvonalához közeli 120 kV-os légvezeték magas oszlopai a térben esetlegesen helyezkednek el. Ezért – esztétikai

¹ Ferdekábeles híd például a jelenleg az M0-s körgyűrűn Budapesttől északra épülő Duna-híd (Lásd Kisbán Sándor cikkét).



4. ábra • Ívhíd egymás felé dőlő
(kosárfül elrendezésű) két ívvel
Pentele híd, Dunaujváros

okokból – a magas pillérű ferdekábeles hidat elvetettük, s megvizsgáltuk az ívhíd megépítésének lehetőségét. A bal parti kikötő alatt szerelőtérnek kiváló helyet találtunk, a Duna az év nagy részében hajózható folyó, ezért e mellett a szerkezet mellett döntöttünk. Ez a szerkezet előnyösebb a kisebb kábel-mellékfeszültségek, kisebb baleseti érzékenysége és nagyobb merevsége miatt is a ferdekábeles hídnál. A kábelekkel függesztett merevítőtartós ívhidaknál különféle kábelrendezés lehetséges. A leggyakoribbak az egymást keresztező kábelekkel épült hidak, mert ez eredményezi a legmerevebb szerkezetet. Pozsonyban – esztétikai okokból – lefelé sűrűsödő, sugaras elrendezést választottak. Mi – szintén esztétikai megfontolásból – a minden nézetből rendezett képet mutató párhuzamos kábelrendezést kívántuk megvalósítani, melynek lehetőségét a BME gondos stabilitási vizsgálataival lehetett igazolni.

A híd leírása

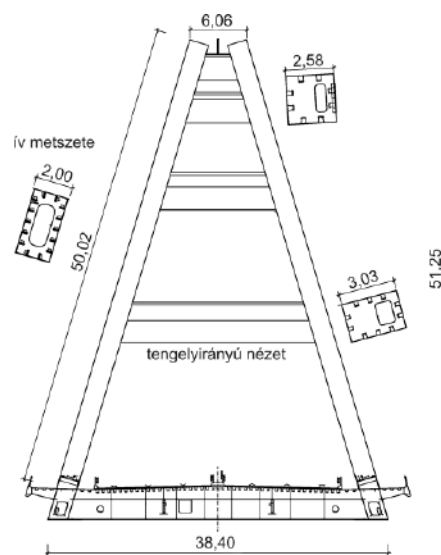
Törekedtünk arra, hogy gyorsan és hatékonyan építhető, gazdaságos és esztétikus, jól üzemeltethető hidat tervezzünk. A terepszonyokhoz legjobban igazodni és a funkciót tökéletesen kiszolgálni, egyben ezeknek a célokknak is megfelelni öt különálló hídszerkezet együttesének tervezésével volt lehetséges.

Az ártéri hidak folytatólagos többtámaszú, ortotrop pályalemez, acél szekrénytartós ge-

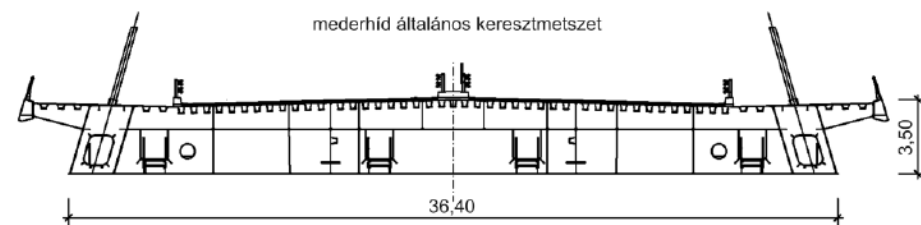
rendahidak, szerkezeti magasságuk a mederhíd merevítőtartójával közel azonos, 3,56 m. A jobb parti ártér fölötti szerkezet támaszközei a hídfőtől: 75,00 + 12 × 82,50 m, a bal parti 4 × 75,00 m. Az ártéri hidakon az autópálya két különböző irányú pályája két egymástól független, egymással párhuzamos hídszerkezeten, 7000 m sugarú ívben van vezetve. A két hídpálya közötti légrés 0,60 m, így a híd teljes szélessége 32,20 m. A szerkezeti elemek acélminősége: S355.

A kéttámaszú mederhíd kábelekkal függesztett merevítőgerendás, kosárfül elrendezésű ívhíd gyártott támaszköze 307,8 m, a sarutengelyek távolsága hídtengetyirányban ennél 10 cm-rel több az önsúlyterhelés hatására létrejövő megnyúlás után. A szabadnyílás a szerkezeti gerendák homloksíkjai között 304,40 m, a felszerkezet elméleti hossza, a csatlakozó dilatációs szerkezetek tengelyének távolsága, 311,95 m. Az ívek dőlése 16,5°, tengelyük magassága hídközépen 48 m (5. ábra). Az ívet a merevítőtartóval függesztőkábelek kötik össze. A kábelek igénybevételeit alapvetően az ívtartó és a merevítő tartó merevségi viszonyai, a geometriai kialakítás és a feszítési technológia határozza meg. Az igénybevételek változásának megfelelően, a támaszok közelében 24, a híd közepe közelében 18 pázmás kábelt építettek be. Az egy ütemben kiépülő pálya beosztása: 2 × 3,75 m forgalmi, 3,50 m széles leállósáv, a két irány között 3,60 m széles elválasztósávban 2 × 1 m biztonsági sáv, 1,60 m kiemelt szegéllyel (6. ábra). A híd befolyási oldalán kétnyomú kerékpárút létesült, a kifolyási oldal – a jövőbeni igényekhez alkalmazkodva – azzal azonos kialakítású. A mederhídon az útpálya tengelye egyenes, a híd a középtengelytől két irányban 2,5-2,5 %-kal, a járdák felülete a kiemelt szegély felé esik 2,5 %-kal.

A mederhíd felszerkezete több szempontból is áttörést jelent a magyar hídépítésben. Mivel a mederhíd úsztatva jutott a szerelőtérre a pillérekre, a lehető legkisebb tömegű szerkezetet kellett tervezni. Ezért választottunk a hazai hídépítésben először nagy szilárdságú, S460-as acélt, azokhoz a szerkezetreszekhez, ahol a szilárdság növelését hatékonyan ki lehet használni, azaz a lemeztavastagságot, ezzel a varratméreteket és mennyiségeket, továbbá az anyagmennyiséget és ezzel a tömeget csökkenteni lehet: az ívtartókban, a csatlakozó merevítőtartó és végkeresztartó elemekben. A nagyszilárdságú acél folyáshatára mintegy 30 %-kal magasabb, mint a hídszerkezeteknél eddig alkalmazott S355 minőségű acélok folyáshatára, ennek megfelelően a méretezési feszültség – a lemeztavastagság függvényében – szintén kb. 25 %-kal magasabb a szokásos minőségű acéléhoz képest. A nagyszilárdságú acél alkalmazása az úsztatási tömeg mintegy 10 %-os csökkentését tette lehetővé.



5. ábra • A Pentele híd mederhídjának keresztmetszete



6. ábra • A Pentele híd mederhídja pályájának általános keresztmetszete

Külön elemzés készült, hogy az S460 szilárdsági csoporton belül a normalizált vagy a termomechanikus hengereléssel gyártott-e a kedvezőbb. A nemzetközi hídépítési tapasztalatok feldolgozását követően termomechanikusan hengerelt, az MSZ EN 10112-3:1995 szabvány szerinti S460ML acélt választottuk. Ez tette lehetővé, hogy a rendkívüli igénybevételeknek kitett, a lehetőségek határáig merevített támasz fölötti csomópontban előmelegítés nélkül, azaz emberi körülmények között lehessen hegeszteni. A mai acélanyagú hidakban a lemezeket hegesztéssel vagy csavarozással kapcsolják egymáshoz, sokszor a két kötésmódot együtt alkalmazva. A kosárfül alakban elrendezett ívszerkezet geometriai összetettségéből és az egyes kapcsolattípusok eltérő méretpontosságú igényeiből következett, hogy a szerkezeti elemek valamennyi kapcsolata hegesztéssel készüljön.

Az ívtartók téglalap keresztmetszetű zárt szelvények, a gerinc magassága 3800 mm, a felső öve 2140 mm, a gerincek között elhelyezett alsó öv 1960 mm széles. Az övlemez vastagsága 20–50 mm, a gerinclemezeké 16–40 mm között változik. A lemezhorpadást hosszbordák akadályozzák meg. A hosszbordák általában 280-22 szelvényű laposacélok, a beúsztatási állapotban szükséges ideiglenes rudak környezetében erősített T-szelvények. A bordák a függesztési pontok harmadában levő diafragmák kivágásain átfutnak, és azok-

hoz fűlekkel vannak rögzítve. Az íveket nyolc gerenda köti össze. Ezek mérete, az igénybevételeknek megfelelően, az alsó kettő-kettőnél 3800 × 2500 mm, a hídközépen lévő kettő-kettőnél pedig 2600 × 2500 mm.

A merevítő tartók az ívekkel közös síkban vannak, így a paralelogramma keresztmetszetű merevítő tartók merőleges gerinctávolsága az ívtartók gerinctávolságának felel meg. Belmagasságuk tartótengelyben 3100 mm, felső övük a pályalemez esésének megfelelően 2,5 %-kal esik a hídközép felé. Az övlemez vastagsága 20–50 mm, a gerinclemez vastagsága 16–40 mm között változik. A merevítőtartókat 11 400 mm-enként velük azonos szerkezeti magasságú, függesztett keresztartók kötik össze. A keresztartók gerinclemezének vastagsága 16 mm, az alsó övlemez 650-25 mm szelvényű. A függesztő kábelek ezekben a csomópontokban csatlakoznak. A lehorgonyzó csöveket 20 mm vastagságú diafragmába behegesztve történik a kábelerők bevezetése a gerinclemezekbe (7. ábra). A merevítőtartók nagy távolsága okán két hosszartóra is szükség volt. A hosszartók – alsó övüknek a függesztett keresztartókon való átvezethetősége érdekében – 500 mm-rel alacsonyabb gerincmagasságúak. A hosszartók gerinclemeze 16 mm vastag, alsó öve 800-40 mm méretű.

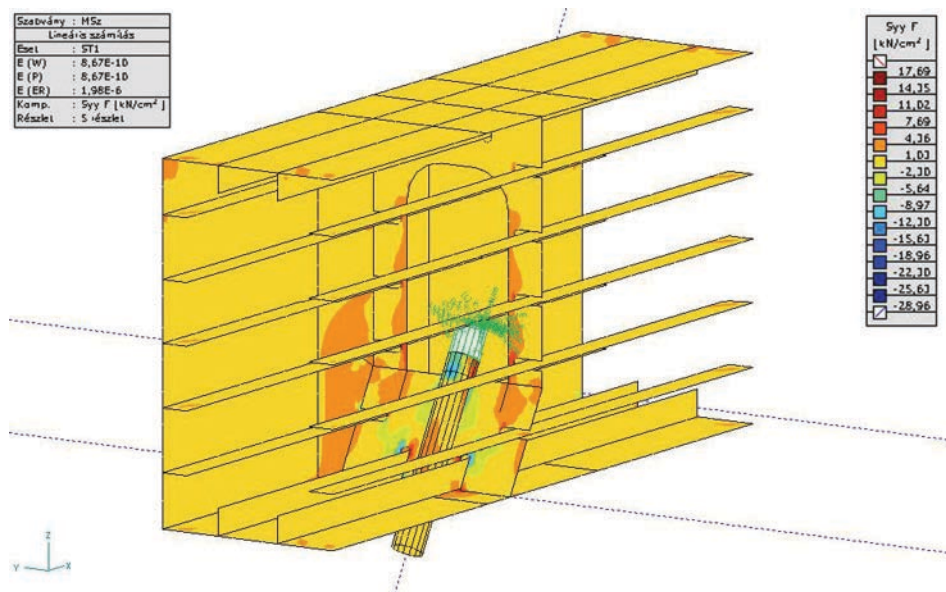
Az ortotrop pályaszerkezetet a függesztett keresztartók között 3800 mm-ként levő közbenső keresztartók támasztják alá. A kereszt-

tartók a merevítőtartóban részlegesen befogott, a hossztartókkal rugalmasan megtámasztott tartóként viselik terhüket. A pályalemez 12 mm-es acéllemez. A pályalemez 8 mm lemezvastagságú, trapézszelvényű bordák merevítik. A gyalogjárda ortotrop acél pályaszerkezete a merevítőtartókba befogott konzolokra támaszkodik, és egyben – a merevítő tartó alapszelvényének részeként – mint felső öv dolgozik.

A sárvári Rába-hídon szerzett tapasztalataink alapján itt is párhuzamos pászmás függesztőelemeket terveztünk. A feszítőkábelek bekötése a diafragmába hegesztett fogadócsövekbe történik.

A mederhíd és az ártéri hidak összhangját és egységességét az alépítmények megfelelő kialakításával is szükséges volt megoldani. A jobb part közel 50 m magas löszfalról ereszkedik le az út a bal part alföldi szintjére. A 10 m bevágással is 40 m a szintkülönbség a két hídfő között. A jobb parton a legtöbb támasz

közel 30 m magas, míg a bal parti 18 jelű alig magasabb 10 m-nél. További kötöttséget jelentett, hogy a pillérek vízbe kerülő részeit gerendaszerűen kellett kialakítani a lehetséges uszadékok, illetve az esetleges jégnyomás miatt. Így az egyes támaszok pillérmagasságainak aránya az 5:1 értéket is elérte. Az egységes megjelenéshez hozzátartozik, hogy a mederpillérek formája sem különbözhet teljesen az ártéri pillérek alakjától. Ezeken a pilléreken pedig egyszerre támaszkodik az ártéri hidak két felszerkezete, egymáshoz viszonylag közel, a pillér közepétől jobbra és balra 4,95 m, illetve 10,45 m távolságra, és a mederhíd a pillér tengelyétől 17,10 – 17,10 m távolságra. Tehát a pillér alátámasztó szerepe a mederhíd alatt a híd szélén, az ártéri hidak alatt pedig a szekrénytartók gerincei alatt, a híd hossz-tengelyéhez sokkal közelebb szükséges. Ezt a funkciót legjobban közelítő geometriát alkalmaztunk, a Kertész Építész Stúdió Kft. találta meg, a kosárfékből szerkesztett szilvamá



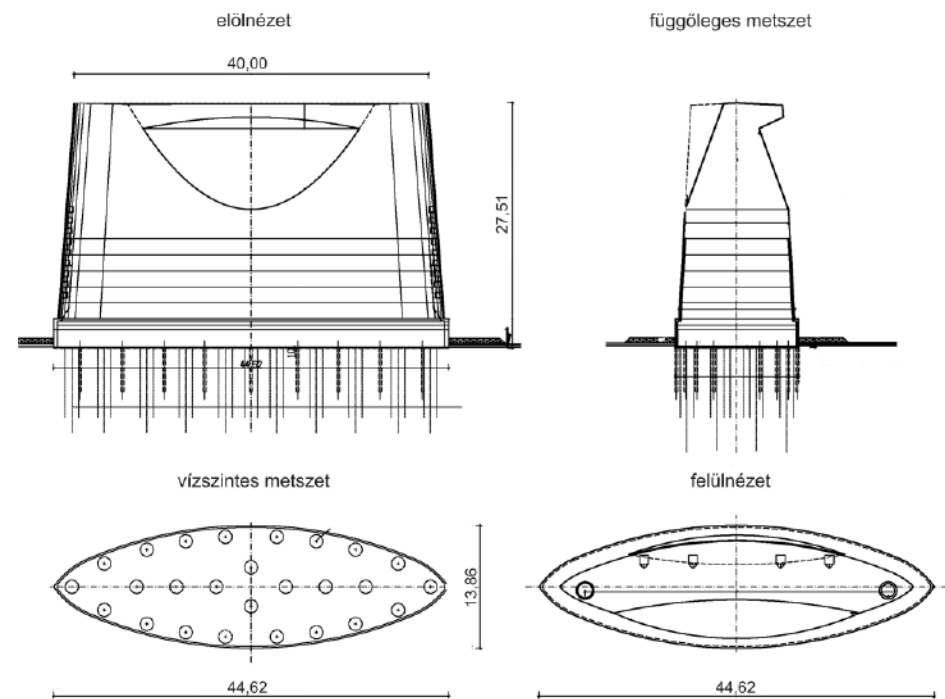
7. ábra • Feszültségek a kábelhorgonyzó cső környezetében, az ívben

keresztmetszetben. A mederpillérek szilvamá alakját vittük át az ártéri pillérekre is.

A mederpillérek – a 14 és 15 jelű támaszok – (8. ábra) szilvamá alaprajzú, tömör vasbeton pillérek, oldalfelületük kb. 18:1 dőlésű kúppalást, amelybe a 100,00 mB. f. szinttől felfelé mindkét oldalról egy-egy csúcsával lefelé fordított, függőleges tengelyű kúp metsz bele. Az ártéri hidak sarui a pillér metszett felületéből kinyúló rövidkonzolon állnak. A konzol úgy alakul ki, hogy az előbbiekben leírt csomoló kúpot egy újabb kúppal visszametszjük. A két kúp tengelye egybeesik. A pillérek felső síkja 5 %-ot lejt kifelé. Az ártéri hidak felőli felső él a talpgerenda keresztirányú tengelyére szimmetrikusan három, egymáshoz érintőlegesen csatlakozó körívből áll: a középső körív sugara 45,3 m, amelynek két végéhez egy-egy 7,30 m sugarú

ív csatlakozik. A mederhíd felőli felső élet, az előzővel azonos kontúrvonalból, a csomoló kúp metszi ki. A kúpmetszések nem csupán esztétikai célt szolgálnak, hanem jelentős betontömeget is megtakarítanak. A pillérek alsó vonala a – csomózatlan – felső peremmel koncentrikus körívekből áll. A pillérek két – befolyási és kifolyási oldali – élet a 100,00 mB. f. szintig egy sor szélességű, kötésben rakott, kopás- és fagyálló, gránit anyagú orrkő falazat védi. A pillérek magassága eltérő: a jobb parti (14 jelű) 25,0 m, a bal parti (15 jelű) – a híd 1,46 %-os lejtése következtében – 20,5 m, a víz alatti beton felső síkja felett.

Az alkalmazott hídsaruk, a szokásos követelményeken túlmenően, meg kell feleljenek a földrengésből adódó igénybevételeknek is. Az egyedi tervezésű saruk teherbírása tette lehetővé az erősen szeizmikus területeken



8. ábra • A 14 jelű mederpillér nézeti és metszeti rajzai

szokásos különleges berendezések beépítésének elhagyását. A mederhídon a 14 jelű pillér befolyási oldali saruja fix, a kifolyási oldali saru keresztirányban elmozduló kialakítású. A 15 jelű pillér befolyási oldali saruja hosszirányban mozgó, a kifolyási oldalon minden irányban elmozduló saru van. A jobb ártéri hídszerkezetek fix sarui a 8 jelű pilléren, a híd-tengely melletti „magas” főtartó gerincek alatt helyezkednek el. A többi belső saru hosszirányban elmozduló. A külső saruk közül a 8 jelű pilléren levő hosszirányban fix, keresztirányban elmozduló, a többi külső saru minden irányban elmozduló. A bal parti ártéri szerkezetek fix sarui a 17 jelű pilléren vannak, a többi saru elrendezése a jobb parti elrendezés rendszerének felel meg.

A híd dilatációi a hídfők és a mederpillérek felett vannak, kialakításukat tekintve fésűs, gumicsatornás szerkezetek. A mederpillérek felett a jobb és bal pályát önálló hidakon átvezető ártéri szerkezetek az osztatlan felszerkezetű mederhíddal csatlakoznak. A saruelrendezésnek megfelelően itt számottevő keresztirányú elmozduláskülönbség is jelentkezik a mederhíd és az ártéri hidak felszerkezetek között. Ennek lehetővé tételében is előnyös a fésűs dilatációs szerkezet.

A híd vízelvezetésének tervezésekor a Közép-Duna-völgyi Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség előírta, hogy az összegyűlő vizek akkor vezethetők közvetlenül a folyamba, ha megakadályozható az élővíz szennyezése. A víznyelőkbe ezért egy magyar fejlesztés eredményeként szabaddalmaztatott olajsűrítő betéteket terveztünk elhelyezni. Ezzel elhagyható volt a nehezen kezelhető, fenntartási szempontból kedvezőtlen, költséges gyűjtőcsatorna kiépítése a híd teljes hosszában, a dilatációkon átvezetve. A 17–21 m-enként az útpályán és a járdán elhelye-

zett víznyelőket csak ott köti össze gyűjtőcsatorna, ahol az áthidalt terület vagy a támaszok védelme azt szükségessé teszi (szeméttelep, árvédelmi töltés, pillérek melletti víznyelők).

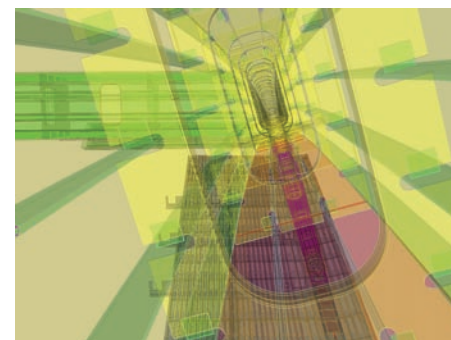
A hídon levő gyalogoskorlát a mederhíd ívszerkezetével harmonizál, külső éle az ív dőlésével párhuzamos. A biztonsági okokból is befelé döntött korlát oszlopai hegesztett T-, vízszintes elemei csőszelvényűek. Ezeket a korlátokat a Kertész Építész Stúdió Kft. tervezte.

A híd éjszakai látványa és a biztonságos közlekedés érdekében teljes hosszban útvilágítás is létesült. Az oszlopok a korláthoz hasonlóan, az ívek dőlésével azonos szögben, az útpálya felé döntöttek. A hajózási útvonal határait jelzőfények mutatják. Az ív nagy magassága miatt repülési jelzőfények beépítése is szükséges volt. Az ártéri szerkezet szekrénytartójában, a mederhíd ívtartójában, merevítő tartójában, végkereszttartójában és ívátkötő gerendáiban belső világítás épült ki.

A tervezés

A hazai gyakorlatban eddig nem alkalmazott, ráadásul a világon eddig megépült legnagyobb támaszközü kosárfülves szerkezetnél mintegy 60 m-rel nagyobb támaszközü híd megtervezése elképzelhetetlen lett volna a legfejlettebb technikát jelentő statikai és acélszerkezeti konstrukciós számítógépi programok alkalmazása nélkül. Mintegy tízezer (ebből közel három-ezer különböző) lemezből több mint háromszáz különböző gyártmányt állítottak össze a tervek alapján! (9. ábra)

A mederhíd méretezéséhez három különböző szoftvert használtunk, megbízhatóságuk, alkalmasságuk szerint az adott feladathoz igazodva. A globális vizsgálatokat héjmodelleken (10. ábra) és héj-rúd vegyes modelleken végeztük el. A különböző szerkezeti részleteket rúdmodellbe ágyazott, nagyon finom

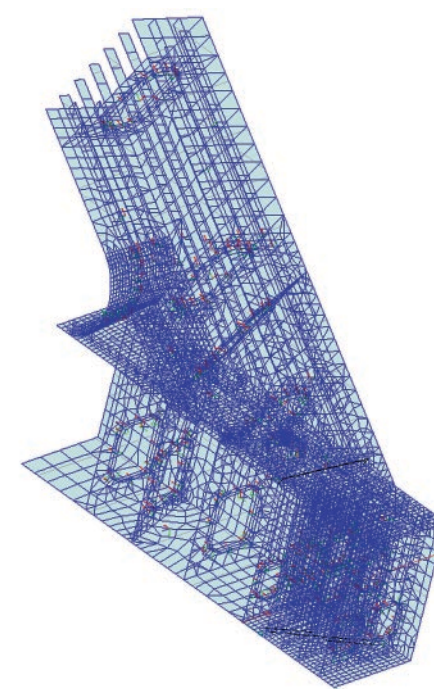


9. ábra • A mederhíd háromdimenziós acélszerkezeti tervének részlete



10. ábra • A mederhíd háromdimenziós végelelemes számítási modelljének részlete

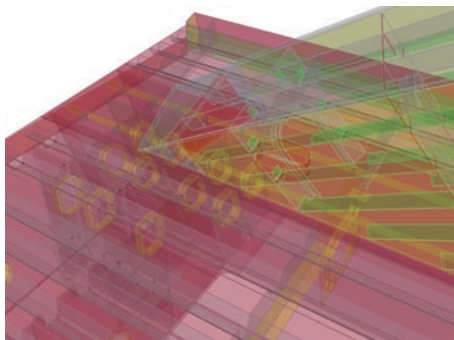
osztású héjmodellel számoltuk. Ezek közül ki kell emelni az ívtartó-merevítő tartó csomópont (11. ábra) ellenőrzését, valamint a saru és az ívtartó-merevítő tartó csomópont emelési hely feletti szerkezeti elemek vizsgálatát. A részletes számítás azt mutatta, hogy a feszültségi trajektóriák átfordulása az ív- és a merevítőtartók között döntően a gerincekben történik meg. Az ívtartó felső övének a tehermentesülése lehetővé tette a csatlakozó, saru feletti diafragmarendszer letisztult és statikailag is helyes megoldását (12. ábra). A fellépő, a hazai gyakorlatban még elő nem fordult, rendkívül nagy reakcióerők miatt részletes vizsgálatra szorult a saruhely és az emelési hely környezete is, egyaránt figyelembe véve a gyártás és az ellenőrizhetőség szem-



11. ábra • Az ív- végkereszttartó-merevítő gerenda csomópont számítási modelljének végelelemes hálózata

pontjait. A rezgésvizsgálatokhoz rúd- és héjmodelleket egyaránt használtunk. A sokszor rendkívül bonyolult, összetett erőjátékú csomópontok vizsgálata, és az úttörő jellegű, valószínűleg előzmények nélküli, nagyon nagyméretű feladat számításában a felépített végelelemes modellek és szoftverekbe beépített programeljárások tesztelésének ideje legtöbbször meghaladta magának a szerkezetnek a számítási idejét.

A híd beüzemelés közbeni állapotát szintén két modellel, rúd- és héjmodellel vizsgáltuk. A rugalmas hídszerkezet szintén rugalmas állványokon keresztül adta át terhét a hajlékony, vízen úszó bárkákra. A rendkívül összetett, bonyolult szerkezetegyesített igénybevételeit és feszültségeit nemlineáris számítással kellett



12. ábra • A saru fölötti csomópont háromdimenziós acélszerkezeti tervének részlete

és lehetett számítani. Az óriási kockázat miatt a számítási eredményeket a bárkák próbaterhelésével is ellenőriztük. A mederhíd acélszerkezeti terveit háromdimenziós acélszerkezeti tervező programmal készítettük el.

Az ortotrop pálya tervezését a BME szakemberei hazai hatályos szabályzatok szerint hajtották végre. Az adott időszakban az Eurocode vonatkozó fejezete többször is megváltozott, ezért részletes vizsgálatot végeztek a pályalemez szükséges vastagságának meghatározására. A BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén – a feszültségkoncentráció meghatározása alapján – végrehajtott vizsgálat szerint a pályalemez vastagságának növelése nem volt indokolt.



13. ábra • A Shinhamadera híd elszállítása a szerelőtérrel (Oszakai-öböl, Japán)

A tervezés különleges feladata volt a tervezett geometriát eredményező feszítési terv elkészítése. Olyan számítási algoritmust dolgoztunk ki, amellyel a kivitelezés során gyors ellenőrzéseket tudtunk végrehajtani, gyors választ tudtunk adni a felmerülő kérdésekre. A végrehajtáshoz időben közeledve többször kellett a tervet átdolgozni annak megfelelően, hogy a vállalkozó folyamatosan aktualizált építési ütemtervéhez alkalmazkodjék: a kevesebb művelet, tehát rövidebb feszítési idő, vagy a pályát alátámasztó támaszközel cölöpök minél korábbi kivételi lehetősége, vagy ezek kombinációja teszik lehetővé a híd legkorábbi beúsztatását.

A megvalósítás

A létesítmény megépítésének talán legkényesebb, legveszélyesebb művelete volt a mederhíd beúsztatása a szerelőtérrel végleges helyére. A művelet során az úsztatandó tömeg mintegy nyolcszorosa volt az eddig hazánkban úsztatott legnagyobb hídtömegnek. A végleges alkalmazott technológia megtervezésekor figyelembe kellett venni, hogy a beúsztatás folyóvízben, nem pedig tengerben (például Japánban [13. ábra]), illetve szabályozott csatornában történik, a hazai kivitelezők rendelkezésére álló eszközökkel és eljárásokkal. A tervezési koncepció rögzítése ezért a FŐMTERV Zrt., a BME, a Hídépítő Speciál Kft. és a GANZACÉL Zrt. mérnökeinek szoros együttműködésével történt.

A bal parton, részben a mederben, részben a parton acélcső cölöpökből építették ki a mederhíd felszerkezetének szerelőtérét. A felszerkezet majdani ideiglenes támaszhelyeire, azaz a szerelőtér négy sarkába, négy-négy fúrt vasbeton cölöpöt készítettek, melyek tetejére vasbeton lemez épült. Ezt a négy támaszt úgy kellett kialakítani és méretezni,

hogy a felszerkezetet rajtuk több mint 7 m magasba fel lehessen emelni. A szerelőtérén észak–déli irányban kezdték meg a pályaszerkezet szerelését. Az építési idő csökkentése érdekében a szerelést a déli oldal irányából is megindították. Ezután, még a pályaszerkezet elkészülte előtt, indult meg az ívek szerelése. A szerkezetek a terhelés hatására alakváltoznak, ezért a szerelt alak eltér a végleges állapotban megkívánt alaktól – a számított lehajlás értékével magasabbra, túlemelve építik meg őket. A Pentele híd ívét közepén 70 cm-rel kellett túlemelni, ennyit hajolt le kiállványozása után és a kábelek megfeszítése során. A szerelés befejezése után, a kábelek megfeszítésével emelték fel a pályát a szerelőjármokról. Ezt a műveletet rendkívül részletes tervezői előkészítés után, az egymást követő technológiai lépéseket és azok hatásait külön bemutató

technológiai utasítás birtokában hat hét alatt végezték el (a gyakorlatban hat hónap sem meglepő átfutási idő – kisebb hidaknál). A híd alakja és a kábeleroők a számításnak gyakorlatilag tökéletesen megfelelték. Ezután a hidat a saruhelyek alá épített emelőjárom segítségével megemelték. A támaszok közelébe öblöket kotortak a bárkák számára. Az állványokat hordó bárkacsoportok behajózása után kezdődött a legkényesebb művelet, az átterhelés a bárkacsoportokra (14. ábra).

A felszerkezetet a művelet végrehajtása során a véglegestől alapvetően eltérő megtervezési módból adódó igénybevételek miatt meg kellett erősíteni. Ezt egyrészt ideiglenes rudak beépítésével, másrészt a szerkezet szelvényeinek erősítésével, merevítésével hajtották végre. Az erősítő rudazat (15. ábra) – a több változaton végzett számítás eredményeképp-



14. ábra • A mederhíd felvétele a bárkákra (2006. december 5.)

pen – ív-főtartónként mindkét végen 2-2 merev végcsomópontú, az 1–2 kábelek között elhelyezett, továbbá egy síkjában csuklós végcsomópontú (16. ábra), a 2-3. kábelek közé beépített, szekrény keresztmetszetű rúdból állt.

A tervezés különleges feladata volt a közel 20 000 kN (!) nyomóerővel terhelt csuklós rúd erőbevezetésének megoldása a merevítő tartó gerincébe, továbbá a nyomóerő terítése a rúd teljes keresztmetszetébe. A közelítő számítás alapján kidolgozott konstrukciót ezért síkhéjelemekből felépített modelleken ellenőriztük, a hazai előírások hiányos volta miatt részben az Eurocode előírásai alapján. Az ívtartók, merevítő tartók és hossztartók egyedi igénybevételek miatti szelvényerősítése mellett szükség volt a merevítő bordázat erősítésére, illetve meghosszabbítására is.

A merevítő tartót, az alkalmazott bárkák geometriai adottságához igazodva, a hídvég-ek közelében 2 × 8 ponton, az 1-2. kábelek közötti mezőben levő keresztartóknál, továbbá a szomszédos 2-2 diafragmánál támasztották alá (17. ábra). Az előzetes statikai vizsgálat azt az eredményt adta, hogy a gerinc behorpadása csak akkor küszöbölhető ki biztonsággal, ha a teherátadás egyenletes, azaz egy ponton a híd súlyának 1/64 része terheli az alátámasztást. Ez önmagában az állványzatrugalmasság, illetve rugalmas betétek révén nem megvalósítható. Az alátámasztás két szélső pontja fölött a merevítőtartó függőleges síkú alakváltozásának különbsége 240 mm. Ennek az alakváltozásnak kellett úgy szabadon megtörténnie, hogy közben minden pontban azonos erő ébredjen a megtámasztási pontokon. Ennek érdekében, a GANZACÉL Zrt. javaslatára, hidraulikus sajtókból kialakított ágyazat alkalmazása mellett döntöttünk.



15. ábra • Ideiglenes merevítő rudak a bárkák alátámasztott mederhídban. Hozzáánk legközelebb a csuklós bekötésű rúd

A beúsztatáshoz alkalmazott TS-bárkák, az alátámasztó állványzat és a híd statikailag sokszorosan határozatlan rendszert alkotnak. Ezért, a szokásos statikai vizsgálaton túlmenően, olyan komplex modellen hajtottunk végre ellenőrzést, amely képes volt figyelembe venni a bárkának, részelemeinek, így kiemelten a bordáknak és a válaszfalnak, az állvány



16. ábra • A csukló a pályalemez fölött

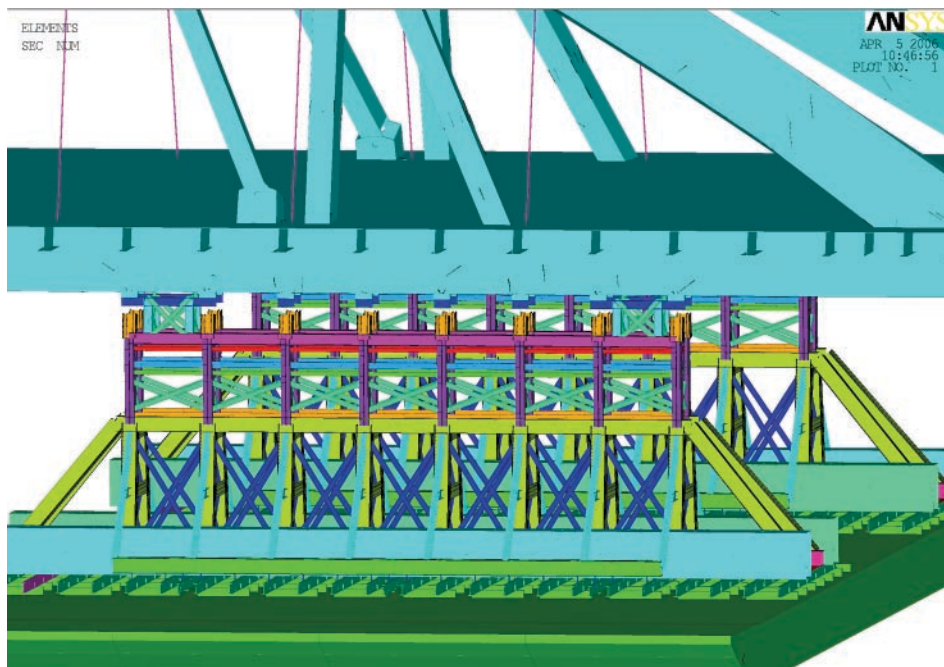
alkotórúdjaiknak és az azt összekapcsoló teherelosztó fabetéteknek, továbbá a hídszerkezetnek a tényleges merevségi viszonyait. A szokásos számítások mellett érzékenységvizsgálatot is végeztünk. Ennek során számításal követtük a teherátadás folyamatát. Elemeztük az esetleges véletlenszerű hatások következményeit – például valamelyik bárka lékesedése, a híddal terhelt úszó bárkák ütközése tetszőleges irányban –, mind a hídszerkezeten, mind a bárkákon. (18. ábra) A vizsgálat célja volt megállapítani a kivitelezőnek megadandó tűréshatárokat, feltárni a kockázatos helyzeteket és mindezekre megoldási javaslatot adni. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a szerkezetegyettesnek több kritikus pontja és kritikus állapota van a napokig tartó művelet során, de a technológiának mindig megadható egy reális tűréshatár, melynek betartásával híd tönkremenetele megelőzhető.

A közel fél évig tartó, heti rendszerességgű egyeztetés mellett folyó tervezés végeredményeképpen alakult ki az alkalmazott megoldás. E szerint a TS-bárkák bordáira a merev állványzat puha- és keményfa alátétek speciális kombinációjával támaszkodott. Az állványzat tetején hídvégként egy közös körre kapcsolt hidraulikus rendszer biztosította, hogy valamennyi támaszkodási ponton azonos nagyságú reakcióerő keletkezzék. A bárkák teherbírásának és a teljes teherátadó, teherelosztó rendszernek alkalmazott számítási eljárás helyességének igazolására próbaterhelés is történt (19. ábra). A mért feszültségek a leginkább igénybe vett elemeknél jó egyezést mutattak a számítottakkal.

A rendkívül kényes teherátadási művelet kézbentartására eredetileg nyúlásmérő bélyegek felragasztását és ezzel a szerkezet, az ideiglenes merevítőrudak és a bárkák kényes pontjai



17. ábra • A bárkákra épített állvány, a híd egyik sarka közelében, 16 ponton támasztotta meg a merevítő gerendát



18. ábra • A bárka–állvány–híd együttes szerkezet háromdimenziós modelljének részlete

feszültségállapotának folyamatos figyelését terveztük. Az előkészítő munkák azonban elhúzódtak. A következő hétre viszont kedvező időjárást jósoltak. Számításaink szerint ugyanis 20 km/h-nál kisebb szélsősebesség volt csak megengedhető a horgonyok korlátozott teherbíró képessége miatt, a Duna vízszintje is éppen meghaladta a bárkák merüléséhez szükséges legkisebb értéket, a csapadégmentes ősz miatt pedig inkább apadás volt várható. A kedvező körülmények elmulasztásával több hónapos késedelmet kockáztattunk volna, így a mérőrendszer elkészítésére nem maradt idő és lehetőség. A gondos előkészítés és a kábelfeszítés során tapasztalt kiváló egyezés a számítás és a mért adatok között kellő alapot szolgáltatott a munka sikeres elvégzésére, ezért hozzájárultunk a beúsztatási művelethez. A teher átvétele másfél napi megfeszített munkával sikerült. A híd a következő napon, 2006.

december 6-án, szerdán behajózott a pillérek elé. A szükséges segédberendezések átszerelésére a kedvező időjárás miatt két napot fordítottak a tervezett néhány órával szemben. Ekkor azonban már a meteorológiai előrejelzés szerint sürgősen le kellett tenni a hidat a várható viharos szél miatt. A szintén hihetetlenül kockázatos első három-négy órai művelet sor tökéletes sikerrel zajlott le. Ekkor a tervezői csapat – egy fő kivételével – elindult hazafelé. Útközben ért minket a hír, hogy az egyik támasz fölött, a megtámasztott lemez és a támasz között rés nyílik. Azonnal leállítottuk a műveletet. Éjjel fél kettőig tartó számításokkal igazoltuk, hogy a tervezett állapot ilyen tönkremenetelre nem vezethet. A hajnali munkakezdetkor ismét sajtókra emelték az érintett támaszt, s a minimális hézag változatlansága igazolta ezt az eredményt. A lemez nem volt ideálisan sík, a hézag eredeti-



19. ábra • A bárkák próbaterhelése

leg is megvolt, egyáltalán nem tárgult. A lemezhorpadás veszélye egy pillanatra sem állt fenn. A híd letétele néhány órán belül sikerrel befejeződött. Az ideiglenes merevítő rudakat napokkal később gyakorlatilag feszültségmentesen tudták kivenni, ami igazolta, hogy a szerkezet épségben, maradékalakváltozások nélkül viselte remélhetően hosszú életében előforduló legnagyobb igénybevételét.

A jobb parti ártéri hidak 1068 m hosszú szerkezetei egyedülállóan hatékony, újszerű technológiával valósultak meg: a Duna felől, szakaszos előretolással épültek (20. ábra). A kb. 17 m hosszú, teljes keresztmetszeti szélességű szerelési egységeket úszódaru emelte a 13 és 14 jelű támaszok között kialakított segédjáromra, ahol teljes keresztmetszetben illesztették őket. Innen indult a tolás az 1 jelű hídfő irányába. A szerkezet elejét ún. vendég-híd támasztotta meg. A BME Hidak és Szerkeze-

tek Tanszéke tervezte vendég-híd kéttámaszú rácsos tartó volt, melyet mindig előretoltak a következő nyílásba, ha a felszerkezet eleje közel 34 m hosszban túlhaladt a következő támaszon. Ezután akasztotta fel rá a felszerkezet elejét, és folytatta annak kitolását a GANZ-ACÉL Zrt. Az összehangolt sajtók folyamatos tolásával a technológia hallatlanul gyorsnak és hatékonynak bizonyult: kellő gyakorlati idő után 12 m/h átlagsebességet értek el. A bal parti ártéri hidak szerelésénél további két, önmagában nem különleges építéstechnológiát alkalmaztak.

A mederhíd alépítményének építésénél kéregelemeket gyártottak, és helyeztek a folyóba, hogy száraz munkaterületen tudjanak dolgozni. Ilyen technológiával már épült híd Magyarországon, Ausztriában és Németországban, de ekkora méretű előregyártott elemekkel még – ismereteink szerint – nem. A leg-



20. ábra • A jobb parti ártéri hidak felszerkezetét rácsszerkezetű gerenda, ún. vendéghíd segítségével, szakaszosan előretolva építették.

nagyobb is a negyede volt az itt használt elemeknek. A 42 m hosszú, 14 m legnagyobb szélességű, 1,80 m magasságú, 0,20 m falvastagságú, szilvamag alakú kéregelemeket egy úszódaru emelte föl, és szállította a helyére (21. ábra). Az emelési kapacitás korlátai miatt, a kéregelemek nemcsak munkagödörhatároló szerkezetek voltak, hanem egyben bentmaradó zsalui is a mederpillérek alsó részének. A szilvamag alakú kéreg rendkívül karcsú falának stabilitásvesztését acél merevítőszerkezetekkel akadályozták meg.

Összefoglalás

A mederhíd kéttámaszú, kábelekkal függesztett merevítőgerendás, kosárfül elrendezésű ívhíd. Támaszköze 307,9 m, jelenleg a vilá-

gon a legnagyobb ebben a kategóriában. Az eddigi legnagyobb hasonló szerkezet a japán Shinhamadera híd volt, melynek támaszköze 254 m. A híd egyben Európa harmadik legnagyobb támaszközü acélszerkezetű ívhídja is. Magyarországon itt terveztek, és alkalmaztak először S460 szilárdsági osztályú, termomechanikusan hengerelt acél hídszerkezetet.

Figyelemreméltó, ahogy a 87 000 kN súlyú szerkezetet egyben, bárkákon úsztatták végleges helyére a bal parti szerelőtérről. Ismereteink szerint, folyami viszonyok között, ekkora és ilyen tömegű hidat még nem úsztattak. A tengerekhez képest korlátozott merülési lehetőség miatt a folyón nincs olyan szállítójármű, ami eleve alkalmas lenne ekko-

ra tömeg, főleg koncentrált erőátadású tömeg szállítására – állványokkal együtt kb. 105 000 kN súlyt vittek a bárkák. A bárkák szempontjából szükséges teherelosztás érdekében a híd sok ponton kell alátámasztani, ami a híd nagymértékű alakváltozása miatt igényelt rendkívül gondos számításokat és különleges intézkedéseket. Az erőbevezetés egyenleteségét a merevítőtartóba, és emellett a szerkezet szabad alakváltozását hidraulikus ágyazattal lehetett elérni.

A dunaujvárosi Duna-híd építésénél nagyon változatos építéstechnológiákat alkalmaztak. A mederhíd felszerkezetének gyártása és szerelése – beleértve a kábelek befűzését és feszítését, a híd parti, majd pilléreken történt emelését és az úsztatást – a kivitelezés alatt folyamatosan új kihívások elé állította a kivitelező és az azt segítő tervező csapatot. Az ártéri hidak felszerkezeteinek szerelésénél négy különböző technológia szerepelt. Az építés-



21. ábra • A mederpillérek építésénél használt egyik kéregelem áthelyezése a gyártótéren



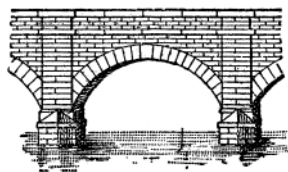
22. ábra • Az elkészült híd

technológiák tervein a tervezők és a kivitelezők a kivitelezés során végig, folyamatos együttműködésben dolgoztak.

A Pentele híd tervezésében és kivitelezésében a magas szintű mérnöki tudás és a felkészült, gondos kivitelező ötletes, hatékony technológiája működött együtt. Fiam, Hor-

váth Ágoston szerint: *ha valaki valami újat alkot, Isten végtelen tervének kis darabját valósítja meg.* Talán ennél a hídnál is ez történt.

Kulcsszavak: *Pentele híd, ívhíd, acélszerkezet, vasbeton alépítmény, beúsztatás, tervezés, építéstechnológia*



APOLLO, A POZSONYI ÚJ DUNA-HÍD

Miroslav Maťaščík

főmérnök
Alfa 04 Tervezőhivatal, Pozsony

Agócs Zoltán

PhD, egyetemi tanár, mérnök
Szlovák Műszaki Egyetem Építőmérnöki Kar, Pozsony
agocs@svf.stuba.sk

Bevezetés

Egy híd koncepciójának kidolgozásánál az építőmérnök szempontjából a funkcionális követelmények az alapvetőek. Ezeket a követelményeket a közlekedési szakember és az idetartozó szabványok határozzák meg. Továbbá figyelembe kell venni a különleges peremfeltételeket: a híd lokalitását, a közeli létesítményeket és a közeljövőben tervezett építményeket, ezek alakját, magassági szintjét, az alapozás lehetőségeit, valamint az új híd hatását a környezetre.

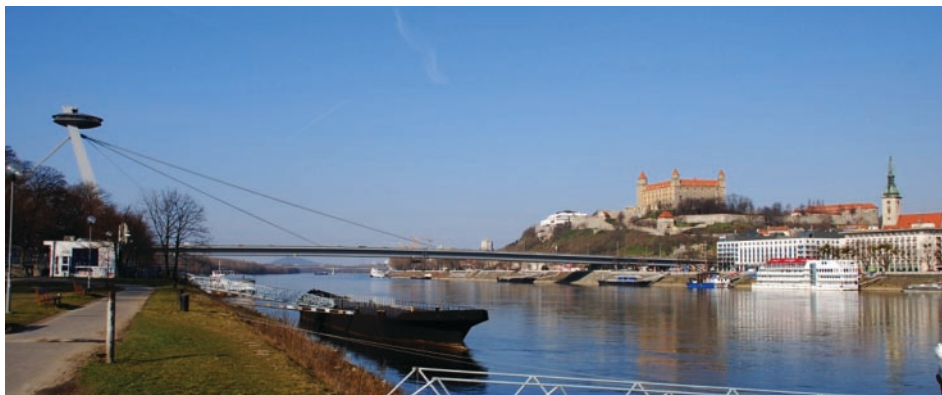
A jelentékeny, korszerű, főleg nagy fesztávolságú hidak korunk fejlettségéről tanúskodnak. A jövő generációk aszerint is ítélnék meg majd bennünket, hogy milyen hídszerkezeteket hagyunk rájuk. Ezért a tervezők közös célja olyan hidat tervezni, amelynél összhangban van a célszerűség, a biztonság, a gazdaságosság, az esztétikai megjelenés, és amely megfelel a környezetvédelmi követelményeknek.

A híd tervezése csapatmunka, ennek ellenére hosszú időn, talán évszázadokon keresztül az építőmérnök-státikus szerepe volt domináns. Fokozatosan kialakult azonban az

a vélemény, hogy a vizuálisan fontos, főleg a látványos városi hidak tervezéséhez már a munka kezdetén meg kell hívni az építész is. Ma sok esetben lehetünk tanúi annak, hogy az építész esztétikai követelményei – az építőtö beleegezésével – túlnőnek a funkcionális és statikai szempontokon.

Napjainkban, a számítógépek világában, a legösszetettebb szerkezet statikai számítása sem jelent problémát. A szerkezetet azonban ma is előre ki kell találni, és el kell képzelni a legapróbb részleteiben.

Az építőmérnök és az építész közötti sikeres alkotói együttműködés jó példája a pozsonyi ferdekábeles aszimmetrikus Duna híd (mai neve Új híd), amely egyedülálló mérnöki alkotás, ugyanakkor magas esztétikai követelményeket is kielégít. 1972-ben adták át a forgalomnak. Ma ez a híd a szlovák főváros újkori szimbóluma, és sok külföldi szakember a világ emlékművei közé sorolja. Az acélszerkezetet tanszékünk tervezte Árpád Tesár professzor vezetésével, az építészcsoporthoz Jozef Lacko professzor vezette (*i. ábra*). A pozsonyi új Duna-híd Szlovákiában a 20. század legsikeresebb mérnöki alkotása címet viseli.



1. ábra • A pozsonyi ferdekábeles Új (Duna) híd

A modern ívhidak jellemzése

Az ívhidakat gyakran a függőhidakkal hasonlítjuk össze. Míg a függőhidaknál a gerendát karcsú, majdnem láthatatlan tartókötelekre függesztjük, az ívhidak esetében a gerenda (főtartó) a látszatra nehézkes nyomott ív(ek)re van függesztve. Az első esetben a nagyszilárd-ságú tartókötel húzásra van igénybe véve, és keresztmetszete teljesen kihasználható. A nyomott íveknél mindig fennáll a kihajlás (stabilitásvesztés) esélye, így az ívek anyagigényesége mindig jelentős.

Ennek ellenére ma újra gyakran használunk két-háromszáz méteres fesztávolságok esetében tömörgerincű alsópályás ívhidakat, ahol a hajlításban merev ív(ek)re a főtartók kötelekkel vannak felfüggesztve. Ez a híd-típus logikus alakjával harmonikusan illeszkedhet be a környezetbe, a részletek precíz és esztétikus megoldása azonban nagy érzékenységet és szakmai tudást követel.

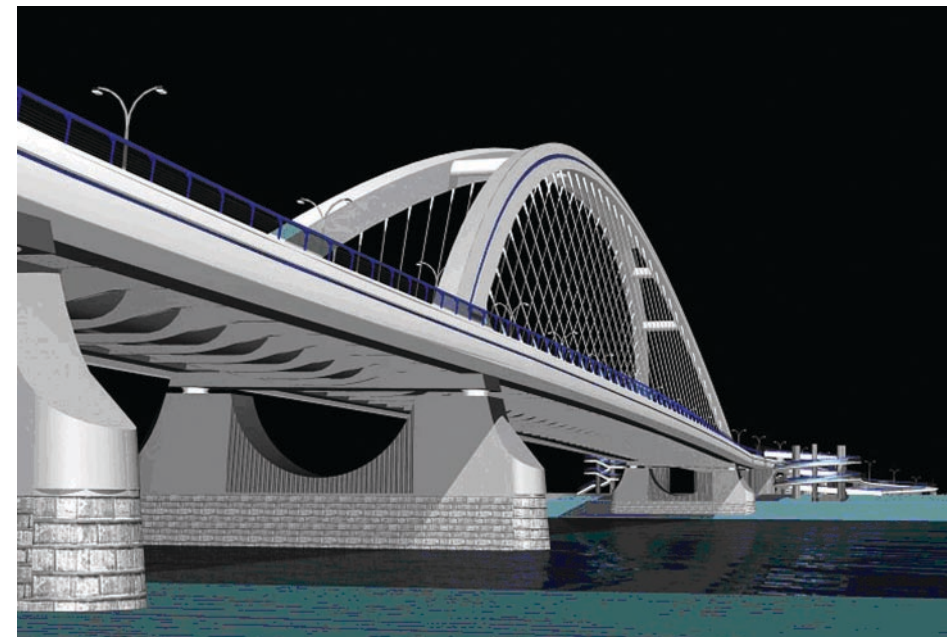
A modern ívhidak tervezésénél és alakjuk megformálásánál fontos szerepet játszik az ívek száma és térbeli elrendezése, az ív magasságának megválasztása, a függesztőkötelek hosszirányú elrendezése, valamint az íveket összekötő keretgerendák alakja és elosztása.

Az új Duna-híd, az Apollo szerkezete

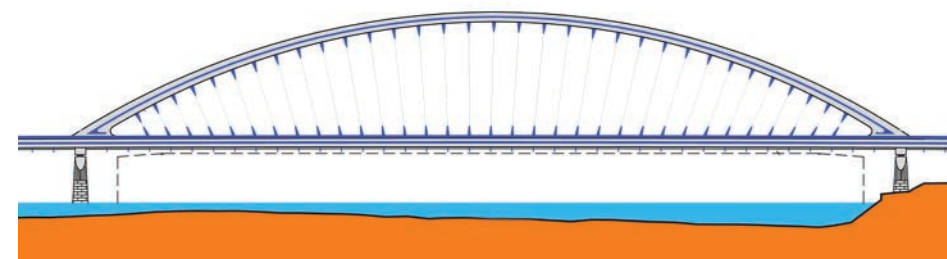
A bevezetőben röviden ismertettük a pozsonyi ferdekábeles Új hidat, ami ma már bekerült a tankönyvekbe. Ezután a híd után megtisztelő, de roppant nehéz feladat hasonló rangú új hidat tervezni a szlovák főváros számára a Dunán. Az előzetes tervezési munkák során négy változatot vizsgáltunk, eredményként kosárfüles ívhíd tervezünk (2. ábra).

A megépült híd a Régi és a Kikötői híd között helyezkedik el, a szintén most épült Nemzeti Színház közelében. A tervek szerint a közeljövőben itt alakítják ki Pozsony új városközpontját, melyben majd magas házak is helyet kapnak. Itt a megválasztott ívhíd semleges alakjával nem befolyásolja a partokon épülő objektumok megformálását. Mivel idővel ez a híd a város központjába kerül, rendkívül figyelmesen kellett az egyes részleteket is kiképezni. A függesztőkötelek alakja úgynevezett „alsó legyező”, ami talán nem a leghatékonyabb függesztési mód, de oldalnézetből sokkal kevésbé zavaró, mint a sokszor használt egy síkban kereszteződő kötelek látványa (3. ábra).

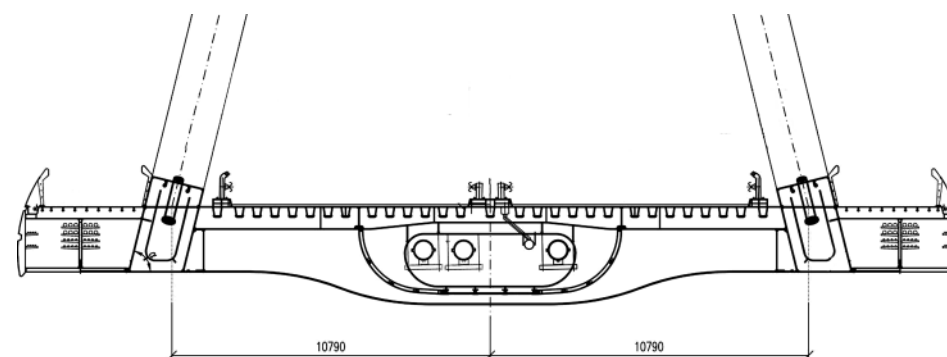
A mederhíd fesztávolsága 231 m, az ívek magassága 36 m. Az ívek egymáshoz hajló



2. ábra • Az Apollo híd látványterve



3. ábra • A mederhíd vázlata



4. ábra • Az Apollo híd keresztmetszete



5. ábra • A híd alulnézetből

ferde síkokban helyezkednek el, a mező végén mereven kapcsolódnak a gerendához. A főtartók, amelyek vonórúdként veszik át az ívek vízszintes erőit, acélkötelekkel hatméterenként vannak az ívekre függesztve. A pályaszerkezetet a mederhíd teljes hosszában acél ortotrop (ortogonálisan anizotrop) lemez képezi (4. ábra).

A hídon átvezető mérnöki hálózatok sokasága alulnézetben lágyan formált lemezborítással takart, ami a domborított szegélytartókkal együtt kompakt hatást biztosít (5. ábra).

A fő keresztartók alakja újszerű (5. ábra), a változó magasságú gerinclemez közepén kialakított nyílásban helyezkednek el az átvezetett hálózatok.

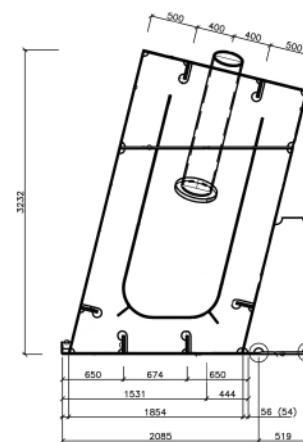
A gerendák (főtartók) parapetszerűen kimagasodnak az ortotrop pályaszerkezet felé (6. ábra). A magasabb főtartók statikailag hatékonyak, és forgalmi baleset esetén védelmet nyújtanak a gyalogjárdákon közlekedőknek. A mederhíd végein a pályalemez egy síkban van a gerendák felső öveivel. Az ívek keresztmetszete a 7. ábrán látható.

A mederhíd szerelési menete

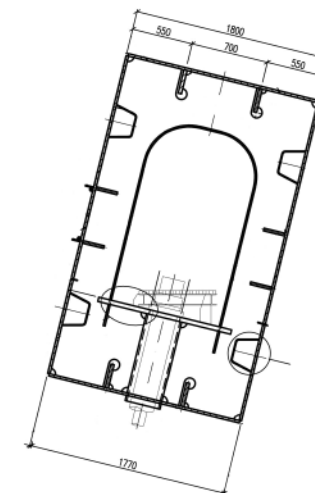
A mederhíd acélszerkezetét a folyó bal partján szerelték össze (8. ábra). Az összeszerelt szerkezet egyik vége a 11-es számú mederpillérre támaszkodott, a másik vége ideiglenes támaszon nyugodott. A mederhíd fokozatos elfordításával került a végleges helyére (9. ábra), a 10-es számú pilléren elhelyezett sarura. Az 5240 tonnás acélszerkezet 2004. szeptember 17-e és szeptember 22-e között került a helyére.

Befejezés

Az Apollo híd előzetes tervei 1999-ben készültek. A próbaterhelések 2005 júniusában fejeződtek be, és szeptemberben a híd ünnepélyesen át lett adva a forgalomnak. Az áthidalás teljes hossza 854 m, a híd szélessége 32 m. A tervezők különös figyelmet szenteltek a lényeges paraméterek megválasztásának, a kapott eredmény: az alapvető igényeket nagymértékben kielégítő, harmonikusan ható, korszerű ívhíd. Az ív és a gerenda formai dinamikáját színárnyalatban eltérő karcsú sávok is fokozzák.



6. ábra • A főtartók keresztmetszete



7. ábra • Az ívek keresztmetszete

Az Apollo híd sikeresnek bizonyult, több hazai és külföldi díjjal is jutalmazták. Amerikában elnyerte az Outstanding Project and Leaders Award-ot (American Society of Civil Engineers). Európában megkapta a European

Award for Steel Structures-t (European Convention for Constructional Steel Work).

Kulcsszavak: statikus hidmérnök, ívhíd, főtartó, keretgerenda, tartókötel, pályaszerkezet

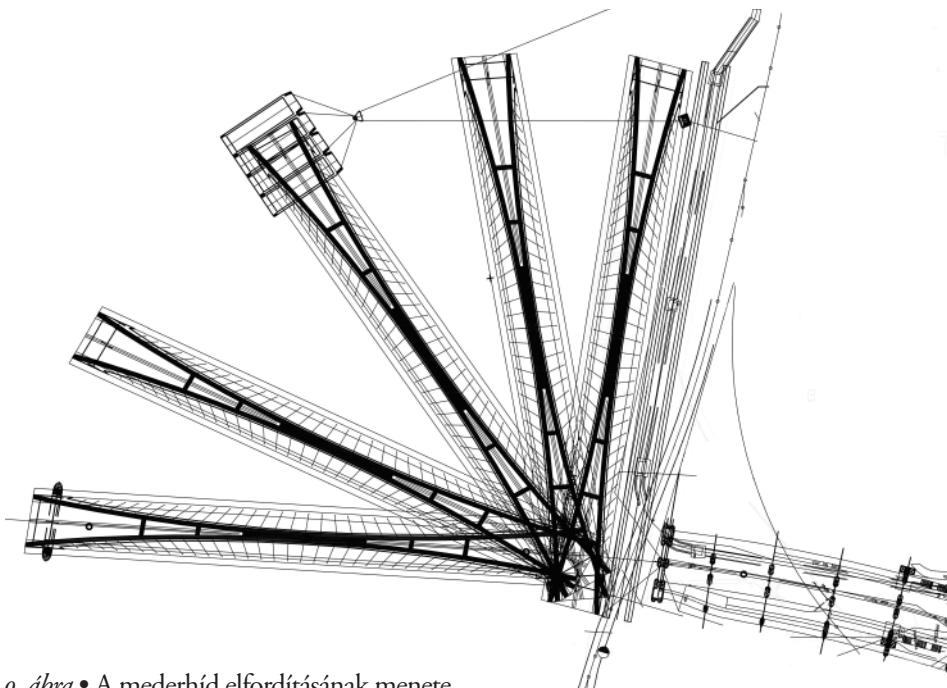
IRODALOM

Agócs Zoltán (2005): A híd – mérnöki szerkezet vagy szobor? In: *Mindentudás Egyeteme*. 4. kötet, Kossuth, Budapest, 267–281.

Mataščik, Miroslav - Agócs Zoltán (2007): *A pozsonyi új Duna-híd tervezése és építése*. Elhangzott az MTA-n, 2007. május 10-én, a *Hídszerkezetek (A tudománytól a megvalósulásig)* című tudományos ülésen.



8. ábra • A mederhíd szerelés közben



9. ábra • A mederhíd elfordításának menete



10. ábra • Az ívhíd befejezés előtt

AZ M0-S ÉSZAKI DUNA-HÍD – FERDEKÁBELES NAGY-DUNA-ÁG-HÍD

Kisbán Sándor

szakági főmérnök
Céh Zrt.
kisban@ceh.hu

A magyarországi gyorsforgalmi úthálózat nagyarányú fejlesztéséről szóló kormányhatározat kapcsán hosszú huzavona után végre elkezdődött a XXI. század első új budapesti Duna-hídjának megvalósítása.

A híd a város határánál, a Budapest körüli M0-s körgyűrű M3-as autópálya és a II-es számú főút közötti északi szektorán keresztezi a Dunát. Az északi szektor tanulmány- és engedélyezési terveinek készítése a már korábban jóváhagyott nyomvonalon 1993-ban kezdődött. A tanulmányterv hét alternatívája közül a negyventagú zsűri által kiválasztott változaton 1994-től folyamatos tervezés során apróbb módosítások történtek a közben megváltozott szabványok és a szigorodó hatósági és környezetvédelmi előírások miatt.

A Megyeri híd névre keresztelt M0-s északi Duna-híd 1862 méteres hosszúságával hazánk leghosszabb folyami hídja, amely öt, egymás után kapcsolódó különböző hídszerkezetből áll, áthidalva a Duna mindkét ágát és a Szentendrei-sziget déli részét.

A Duna főágában, a váci oldalon, Magyarországon eddig nem alkalmazott ferdekábeles, háromnyílású hídszerkezet épül. A híd két pilonnal készül, a kábelek legyezőszerűen két síkban függesztik fel 12 m-enként az acélszer-

kezetű merevítőtartót. A híd támaszközei 145 + 300 + 145 m, összhossza 590 m. Mind a pesti oldalon, mind a szentendrei-szigeti oldalon a csatlakozó hídszerkezetek feszített vasbeton ártéri hidak.

Az M0-s autópályán átvezetett szakasza 2x2 forgalmi sávossal, leállósávval. A hídon a leállósáv az előírtnál szélesebb. Később, ha a forgalom növekedése megköveteli, a kétoldali leállósávok megszüntetésével a kocsipálya 2x3 forgalmi sávossá bővíthető a hídszerkezet átalakítása nélkül. A híd északi oldalán mozgássérültek közlekedésére is alkalmas kerékpárút, a déli oldalon gyalogjárda épül. A kocsipálya burkolata aszfalt, a gyalogjárda kopásálló, érdesített, sókorrózió elleni bevonatot kapnak. A híd közvilágítással, hajózási és repülési jelzőfényekkel kerül kialakításra.

A Dunába kerülő mederpillérekkel kapcsolatban folyamáramlási és mederfenék-kimosási hatásvizsgálatok készültek. A szimulációs vizsgálatok megállapították: a tervezett mederpillérek elhelyezése áramlási szempontból kedvező, jelentős áramlásmódosulás nem várható. A hajózás biztonságát, a meder és a part állékonyságát a pillérek nem veszélyeztetik.

A parti közös pillérek és a két mederpillér alapozása mélyalapozással, nagytérű fúrt



vasbeton cölöpökkel készül. A 19,00 – 20,50 m hosszú cölöpök átmérője 1,50 m. A cölöpök mind a négy alaptestnél a kiváló teherbírási alapközetbe, az oligocén korú szürke márgás sovány és közepes agyagrétegbe kerülnek. A mederpillérek alépitménye a folyami hidaknál már alkalmazott és bevált vasbeton kéregelemes módszerrel készül. Az alépitmények áramlástanai szempontból kedvező csúcsíves kialakításúak, az orr-rész fagyálló gránitburkolattal van ellátva.

A merevítőtartó nyitott két szélén szekrényes keresztmetszettel készül a kétoldali kábelfelfüggesztés miatt. A kábellehorgonyzások tengelytávolsága hídtengetyre merőlegesen mérve 29,80 m. A bal és jobb pálya középen szegéllyel és korláttal van elválasztva. A felszerkezet teljes szélessége 36,83 m, szerkezeti magassága 3,63 m. A merevítőtartó hegesztett ortotrop pályalemezű acélszerkezet. A szekrénytartók külső oldalán konzolok támasztják alá a járdákat. A merevítőtartó felülete 21 700

m², a felhasznált acélmennyiség 8455 tonna. Anyagminősége MSZ EN 10025 szerint a teherviselő szerkezetek esetén S355, és az alárendelt szerkezetek esetén S235.

A merevítőtartó építése szabadszereléssel történik. A pilonoknál szerelésindító segédállvány készül, ami hídtengety irányban 50 m hosszú merevítőtartó szakaszt támaszt alá. Ehhez kapcsolódnak a mérlegelv betartásával a parti, majd a meder oldalon a 12,0 m hosszú, 160 tonnás szerelési egységek, helyszíni hegesztéses illesztéssel. Az illesztés elkészítése után minden szerelési egység egy ferdekábelpárral kerül felfüggesztésre a pilonszerkezethez.

A parti nyílásokban, a pilonoktól 60,0 m-re szerelési járomtámasz készül, biztosítva az építés közbeni szerkezeti stabilitást. A járomtámasznak köszönhetően az építés során fellépő igénybevételek nem haladják meg a végleges hídszerkezet igénybevételeit, elősegítve ezzel a gazdaságos építést. A merevítőtartót kábelsíkonként 4×11 db, összesen 88 db térbeli



kábel függeszti fel a pilonokra. A függesztőkábelek héteres pászmákból párhuzamosan kötegelve készülnek. A kábelek az igénybevételeknek megfelelően 31, 37, 55 és 61 pászmából kerülnek kialakításra. A kábelek anyaga Fp150/1860. Lehorgonyzásuk a merevítőtartóban és a pilonokban történik.

Feszítésük az alsó, a merevítőtartó szekrényében kialakított lehorgonyzásnál történik, pászmáknkénti feszítéssel. A kívánt feszítőerő beállítását az ún. „isotension” eljárás biztosítja. Az aktuális pászmafejtés kihat a már megfeszített elemek megnyúlására. Az elsőnek megfeszített ún. „vezérpászma” feszültségmódosulásának figyelemmel kísérésével kerülnek meghatározásra a soron következő pászmafejtések feszítőerői, biztosítva, hogy a feszítés befejezésekor a teljes kábelkeresztmetszetben az előírt egyenletes feszültség ébredjen.

A pilonban kialakított felső lehorgonyzásnál a kábelfejben kialakított csavaros állítási lehetőséggel a későbbiekben mód van a kábel-erő kismértékű változtatására, korrigálva az időben lejátszódó folyamatok hatását. Ilyen

a pilon vasbeton anyagának kúszása-zsugorodása, ami kismértékben módosítja a ferdekábelek alsó és felső lehorgonyzási pontjai közötti távolságot.

A kábelek lengését, rezgését a járda felett egységesen 850 mm-re, a vandálcső-védelem belsejében elhelyezett csillapító berendezés szabályozza. A várható igénybevételeknek megfelelően alkalmazott csillapító berendezések energialelnyelése mechanikus, illetve hidraulikus elven történik.

A kábelrezgésekkel kapcsolatos vizsgálatok szerint számottevő kábelrezgések csak a szél-eső okozta „táncolási” gerjesztésből adódhatnak. Ez az egyenes hídkábelek leggyakrabban megfigyelt rezgési jelensége. Az öngerjesztés elsősorban a kábel felületén folyó víz által megváltozott keresztmetszeti alakra vezethető vissza: bizonyos szélsőségek és szélirányok mellett a szélnyomás a kábelfelület alsó oldala felé igyekvő esővizet visszatartja. A kábelfelület felső részén így egy kidomborodó vízer keletkezik, amely – a kábellel magával, valamint az alsó felületen mindig jelen levő



vízrel együtt – egy táncolásra érzékeny keresztmetszetet képez.

A jelenség kialakulását nagymértékben csökkenti a már az M0-s északi hídnál is alkalmazott speciális műanyag kábelburkoló cső, ami a külső oldalán kettős spirál formájú, 600 mm menetemelkedésű, 1,6/3 mm keresztmetszetű bordázattal készül.

Szükség esetén lehetőség van egy-egy kábel cseréjére. Ilyenkor a munkavégzés miatt elegendő csak a szélső sáv lezárása, egyéb forgalmi korlátozás nem szükséges.

A két pilonszerkezet vasbeton szekrény keresztmetszetű pilonszárakból kialakított „A” formájú térbeli keretszerkezet. Magasságuk az alépitmény felett 100 m, a pilonszárak



külső befoglaló mérete az alépitményi befogásnál 51,0 m. A pilonszárak keresztmetszete 5,0 x 4,0 m-ről parabolikusan csökken 3,5 x 4,0 m-re, a falvastagság szintén változik, 1,0 m-ről 0,5 m-re csökken. A pilonszárak külső élei $R=300$ mm-es lekerekítéssel készülnek, csökkentve ezzel a szélörvények kialakulási lehetőségét. A pilonszerkezetek betonminősége C40/50.

A keretszerkezetű pilonban a hídszerkezeti önsúly és a ferdekábelek előfeszítő erőrendszerének együttes hatására keletkező keresztirányú hajlító igénybevételek keresztirányú feszítéssel kerülnek kiegyenlítésre. A feszítést a pilonszárak külső falában elhelyezett 40 mm átmérőjű feszítőrudak biztosítják, anyagminőségük I030.

A pilonszárakat az alépitményi befogás felett 55,0 m-re egy szekrény keresztmetszetű vasbeton gerenda köti össze. Az összekötő gerenda feletti pilonszár szakaszokban kerülnek elhelyezésre a ferdekábelek felső lehorgonyzását biztosító acélszerkezetű elemek.

A lehorgonyzó kamrák földemeivel egyidőben bebetonozott szerelvényként az egyes lehorgonyzási szinteken acélszerkezetű lehorgonyzó elemek készülnek, melyek biztosítják a ferdekábelek felső lehorgonyzását, a függőleges terhelést közvetlenül a pilonszár 60 cm vastag falának adják át, a vízszintes teherkomponensek pedig az acélszerkezeten keresztül záródnak. Építési állapotban a merevítőtartó szerelések, végleges állapotban pedig kábelcsere esetén a féloldalas terhelést az acélszerelvény alapján kialakított acélszerkezetű nyírófogadja át a vasbeton földémszerkezetnek.

A pilonszárak belső kialakítása az építettői igényeknek megfelelően történt.

Az északi pilonszár a ferdekábelek legalsó lehorgonyzási szintjéig belső lépcsővel, míg a déli pilonszár belső ipari lifttel lett ellátva. Az

összekötő gerendából induló függőleges lift a pilonfejig biztosítja a szerkezetek elérhetőségét. A lifttel kialakított pilonszakaszok egyben belső hágcsóval is megközelíthetők. A pilonszárak és az összekötő gerenda közötti háromszög acél falvázoszlopokra szerelt homlokzati üvegfallal készül, javítva a híd esztétikai megjelenését.

A merevítőtartó acélszerkezetű konzolok segítségével támaszkodik közvetlenül az alépitményi befogás felett 9,0 m-re kialakított, 1,35 m magas vasbeton pilonszár rövid konzolokra.

A rövid konzoloknál kerül kialakításra a merevítőtartó hosszirányú megtámasztása, hidraulikus támaszokkal. A hidraulikus támaszok lassú erőváltozásokra – hőhatásra, kúszás/zsugorodásra, támaszsüllyedésre – elhanyagolható mértékben reagálnak, míg gyors teherváltozás esetén – fékezőerő, szélteher, földrengés – merev támaszként működnek.

A pilonszárak kúszózsálas építési technológiával, az általános szakaszokon 4,07 m-es magasságú építési ütemekben készülnek. A kapcsolódó szerkezeti pontoknál (rövid konzol, összekötő keretgerenda, ferdekábel-lehorgonyzások, pilonfej-csatlakozás stb.) további munkahézagok kialakítása szükséges. A konzolos pilonszárépítés miatt az alépitményi befogás felett 32,0 m-re és 52,0 m-re kitámasztó acélszerkezetű segéd tartók kerülnek beépítésre. A felső segéd tartó egyben az összekötő gerenda zsaluzatát is alátámasztja.

A merevítőtartó szabadszerelésével összhangban, a merevítőtartó parti nyílásban történő járomlekötése után kerül sor a pilonszárak és az összekötő gerenda közötti háromszög földemeinek, a függőleges liftaknának és a homlokzati üvegfallnak az építésére. Ez az építés alatti mértékadó szélteher csökkentése miatt szükséges.



A környezetvédelem fontos szempont volt a híd kialakításánál. A főváros vízellátását biztosító bal parti árterület és a Szentendrei-sziget fokozottan védett terület. A szigetre a hídról nem lehet lejárni, az élővilág, a környezet védelme érdekében a sziget feletti ártéri híd mindkét oldalán zajárnyékoló fal épül. A csapadékvíz elvezetése a hídról zárt rendszerben történik, és csak tisztítás után kerül a befogadóba.

Az M0-s északi híd jelenleg építés alatt áll. A beruházás megvalósítását a Hídépítő Zrt.-

ből és a Strabag Zrt.-ből alakult M0 Északi Duna-híd Konzorcium végzi. A híd generáltervezője a Céh Zrt. A híd építése 2006-ban kezdődött, befejezése, forgalomba helyezése 2008-ban történik.

A híd esztétikai megjelenésével méltón illeszkedik a főváros szép hídjainak sorába, és növeli a főváros jelképeinek, látványosságainak számát.

Kulcsszavak: *ferdekábeles híd, acélhíd, hidtervezés, hídépítés*

A KŐRÖSHEGYI VÖLGYHÍD FELSZERKEZETÉNEK TERVEZÉSE ÉS ÉPÍTÉSE

Wellner Péter

osztályvezető, Hídépítő Zrt.
wellhid@enternet.hu

A megépült híd

A Kőröshegyi-völgy legalacsonyabb pontja felett 88 m magasan, majdnem két kilométer hosszban vezet az autópálya forgalmát a Kőröshegyi völgyhíd (1. ábra). A hídszerkezet a hídfőkhöz csatlakozó, két-két 60 és 95 méteres kisebb nyíláson kívül, egymástól 120 m távolságban épült tizenhat pilléren, és a két hídfőn támaszkodik. Ez a híd egyetlen darab-ból áll. Anyaga feszített vasbeton.

A műtárgy elhelyezkedése a környezetben

Amikor a feladat megoldásával találkozunk, sok lényeges dolgot már eldöntöttek. Az út

a Balatontól ilyen távol és ilyen közel épül. Így nem nyomja a településeket a tóhoz. Enged fejlesztési lehetőséget. Nincs olyan messze, hogy az üdülőterület megközelítéséhez túl hosszú utakra lenne szükség. A terület hegyes-völgyes, na jó, dimbes-dombos vidék. Egy autópályán mindenki szeret viszonylag nagy sebességgel közlekedni. Az emelkedés tehát nem lehet túl nagy. A Zamárdi és Ordacsehi közötti szakaszon néhány völgyet keresztez az autópálya. Ezek legnagyobbika felett épült a Kőröshegyi völgyhíd. A két végpontot összekötve a szintkülönbség 53,4 m. Az utat lehetett volna alacsonyabban vezetni. Ekkor azonban a dombokon keresztül alagúton át kellett volna bújni. Az alagút fenntartása,



1. ábra • A megépült völgyhíd

szellőztetése, forgalombiztonsága alighanem nagyobb költséget igényelt volna. Az építési tapasztalat nálunk az alagútépítés területén csekély. Hídépítéseknel jelentős tapasztalattal rendelkezünk. Tudom, ez nem a reklám helye. Azért ami igaz, az igaz. Olyan autós is van, aki az alagútban egy kicsit bezárva érzi magát. A hídon talán nem. Tulajdonképpen számunkra ez már eldöntött feladat volt. Csak utólag, több véleményt hallva ragadom meg az alkalmat, hogy pár gondolatot megfogalmazzak.

*Amíg az engedélyezési tervből
kiviteli terv készülhet*

Adva volt tehát egy hatósági engedéllyel bíró tenderterv. Első lépésként a kiviteli terveket kellett elkészíteni. Az építészeten szokásos, hogy az engedélyezés során minden olyan tényezőt vizsgálnak, amely a műtárgy építése során a környezet érintettségét jelenti. Vizsgálják a szabályok betartását. A terület beépítési mértékét, a megfelelő elhelyezkedést, az oldaltávolságot, a párkánymagasságot stb. Az építményen belül a tervezésnek az előírtakon túl bizonyos szabadsága van. Az út és hídépítésnél elméletileg hasonló, részben azonban nagyobb kötöttséget alkalmaznak. Egyes részletek, amelyeken a tervezés során változtatni kellett, természetesen nem alapvető, de fontos részek módosítását tették szükségessé.

Elsőként a híd hosszával gyűlt meg a bajunk. Az eredeti terv hídfői kb. 30 m magasak voltak. A hídfő mögötti töltés is ilyen magas lett volna. Ezt a földtömeget egy hídfővel megtámasztani erőtanilag ugyancsak tisztas, bár nem lehetetlen feladat. A költségek azonban jelentősek, bár természetesen fizethetők lettek volna. Nagyobb bajt jelentett, hogy a geotechnikai szaktervezés a töltés 9-12 hónapig tartó süllyedését jelezte. Ez már „kiverte a biztosítékot”. A műszaki következmények-

ről nem is szólva, ennyit nem várhattunk arra, hogy a töltés méltóztatassék szép lassan összenyomódni, lesüllyedni. Majd utána a megfelelő magassági helyzetet figyelembe véve építenénk meg a hídát. Követtük az egyetlen világos lehetőséget. A hídát mindkét oldalon meghosszabbítottuk 51 méterrel. Így a híd a völgy végéig ért, és a hídfők magassága csak kb. 6 m lett. A hídfő és a mögötte lévő töltés ilyen magassága pedig általános esetnek minősül. Ettől a híd ára nem változott, a határidő nem módosult, és az autópálya megvalósítására rendelkezésre álló terület nem lett nagyobb, sőt a két irányban szükséges részsűk által elfoglalt több mint száz méter széles területre nem volt szükség.

A következő változtatás a híd külső megjelenésében nem jelentett módosítást. Az egyetlen szerkezettel átvezetett út szélessége miatt a vasbeton dobozkeresztmetszet felső lemezének túl nagy távolságot kellett volna áthidalnia. Az eredeti tervben ezért középen két ferde acéldúc támasztotta volna alá. Mi úgy gondoltuk, hogy középen inkább egy vasbeton bordát tervezünk. Ezzel a szerkezet homogenitása és merevsége kedvezően alakult.

A változtatásokat csak azért tartjuk említésre méltónak, mert látható, hogy a kiviteli tervek készítése során több, az alapvető igényeket nem érintő, mégis műszakilag előnyösebb megoldás lehetősége is adódhat. Ezt szükséges támogatónak lehetné tenni. Itt a Kőröshegyi hídnál ezeket a lehetőségeket mind a megrendelő, mind az illetékes hatóság egyetértésével és támogatásával lehetett megvalósítani.

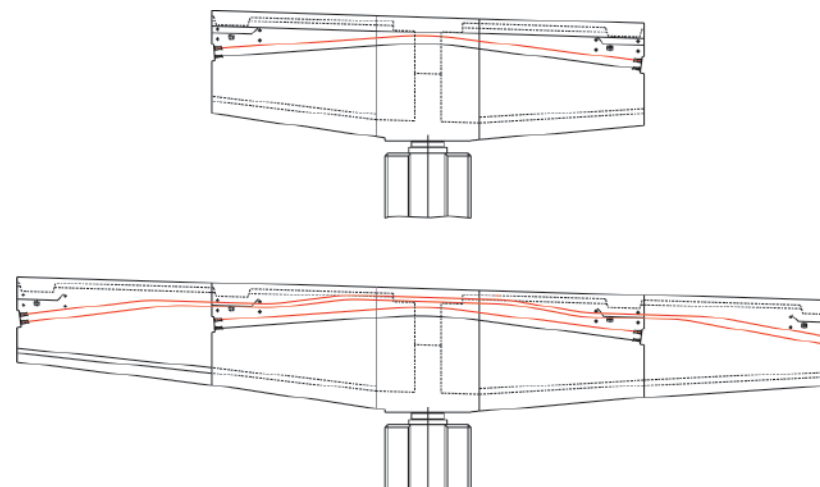
*Tervezés és kivitelezés,
mint a hídépítés egyetlen fázisa*

A híd egyes részeinek megépítése nem mindennapos feladat volt. 30-80 m magas pillérek építése sem mindennapos feladat, de ami

igazán különleges, az a 80 m magasságban épülő, 120 méteres, 23,20 m széles vasbeton hídszerkezet megvalósítása. Ezen belül első feladat természetesen a felszerkezet tervezése volt. Természetesen csak azt lehetett megépíteni, amit előzetesen megterveztünk. Ezt könnyű mondani, de a gyakorlatban a jó eredmény elérése érdekében ez még nem elegendő. Tudni kellene, hogy milyen módon kivitelezhető ez a nem mindennapi szerkezet. Ahogyan mondani szoktuk, feltétlenül tudni kell, hogy milyen az építési technológia, milyenek az organizációs körülmények. Ezek csak az építést végrehajtó szakemberekkel együtt dolgozva határozhatók meg. Vagyis igaz az is, hogy helyesen megtervezni csak azt a műtárgyat lehet, amelyről tudjuk, hogy milyen módon lehet, és valóban milyen módon fogják megépíteni. A tervezés és a kivitelezés egy híd megvalósításának elválaszthatatlan része. Az együttműködés szükségessége a tervezés első fázisától a híd építésének utolsó fázisáig szükséges. A Kőröshegyi völgyhídnál ez így is történt. A sikeres megvalósításnak ez alighanem egyik fontos tényezője volt.

Az építési technológia alapelve már az első pillanatban egyértelmű volt. Nyilvánvalóan nem lehetséges az 1872 m hosszú, 23,2 m széles és a legmagasabb ponton 80 m magasságban a völgyet beállványozni. Természetesen csak állvány nélküli, szabadon építés alkalmazása volt lehetséges. Az előzetes fázisokban, helyesen, a szabadbetonozásos építési technológiát jelölték meg. Ennek lényege, hogy egy pillér felett elkészítünk egy – adott esetben 6,0 m hosszú – indító szakaszt. Ezután jobbról és balról egy zsaluzatban elkészítünk egy-egy, vasbeton szakaszt. Miután a beton megszilárdult, nagyszilárdságú acélpázmás kábelekkel feszítjük egymáshoz (2. ábra). Ezzel elértük, hogy a zsaluzatot tovább lehet mozgatni a következő szakasz építéséhez. Így épül meg egy pillértől két irányban a híd egy-egy szakasza, a szomszédos nyílás közepéig. A szomszédos pillérről hasonló módon épülő hídszakasszal közepén egy záró zömmel építik össze.

A feladat világos meghatározása után az organizációs körülményeket kellett rögzíteni. Ezek meghatározó jelentőségét két tényező ismertetésével lehet bemutatni.



2. ábra • A szabadbetonozásos építés

Az egyik tényező a rendelkezésre álló, rendkívül rövid építési idő. Az építés megkezdését néhány, a vállalkozóktól független körülmény is késleltette. Ezzel a nehézséggel szinte minden nagy építkezésnél lehet találkozni.

A feladatot három év alatt végeztük el. Ezen belül a különleges körülmények között, a különleges építmény felszerkezetét 2005. május elejétől 2007. május 9-ig, két év alatt építettük meg. Ez figyelemre méltó eredmény. Aki utánanéz, a nemzetközi gyakorlatban a hasonló feladat építési idő adatainak, ezt megelégedéssel nyugtázhatja. A határidő teljesítése érdekében a hidat mindkét hídfőtől indulva, egyidejűleg építettük. Mindkét oldalon egyszerre két-két pillért építettünk, és a felszerkezetet is kétoldról készítettük. Az építési anyag beszállítását egyidejűleg mindkét oldalról kellett biztosítani. Ezzel az organizációs módszerrel az építési sebesség kétszeresére növekedett.

Meg kellett határozni, hogy milyen hosszú szakaszokat tervezzünk. A nemzetközi gyakorlatban és a mi régebbi gyakorlatunkban is, a szakaszok hossza öt, maximum hat m volt. Rövid számítást végezve arra az eredményre jutottunk, hogy ezt a hidat így nem lehet határidőre megépíteni. Szükséges, hogy egyszerre hosszabb, sőt minél hosszabb szakaszokat készítsünk el. A következőkben tárgyalta az is figyelembe véve döntő mértékben 11,25 m hosszú elemeket tervezve, tizenkét-tizennégy napos építési ciklusidővel lehetőség látszott a határidő teljesítésére.

A másik meghatározó tényező, hogy milyen építési segédszerkezettel lehet a feladatot végrehajtani. A szerkezettel szemben támasztott követelmények az alábbiak voltak:

- Geometriailag 11,25 m hosszú, 23,2 m széles, 7,0–3,5 m között változó magasságú betonelem zsaluzását biztosítsa.

- A zsaluzat 700 tonna súlyú szakasz teherbírását biztosítsa.
- Egy szakasz elkészülte után a zsaluzatot a következő szakaszhoz tudja mozgatni, és az íves híd igényeinek megfelelően tudja beállítani.
- Az elkészült szakasznak az előző szakaszhoz történő zárásához használni lehessen.
- Egy pillér feletti ág elkészülte után a zsaluzatokat a következő pillérre át tudja szállítani, tekintettel arra, hogy ezek le- és felszerelése a rendelkezésre álló időben nem lehetséges.
- Az építéshez szükséges anyagok (beton, betonacél, feszítőkábel stb.) beszállítását a 80 m szabad magasság felett is tegye lehetővé.

Egy ilyen segédhíd-szerkezetet, amelyet ugyan a mi igényünknel kisebb híd építésénél alkalmaztak Olaszországban, sikerült találtunk, és a német Peiniger Röro cégtől bérelték. A helyszínen a Hídepítő Zrt. részéről a vezérigazgató által megbízott felelős igazgató, két-két vezető kivitelező és tervező ismerkedett meg a szerkezettel. Hosszú vizsgálódás, számos módosítási igény elfogadtatása után ilyen szerkezetet béreltünk. Biztosak vagyunk abban, hogy a magyar szakemberek munkájával az eredetinel jobban működő két segédhidat sikerült előállítani. Egy-egy ilyen szerkezet egyenként 1600 tonna súlyú volt (3. ábra).

Az alatt az idő alatt, míg a megfelelő technológiai segédszerkezet tervezése és gyártása folyt, a híd felszerkezetének tervezése is megkezdődött. Meghatároztuk a használati állapothoz szükséges feszítési rendszert, a szükséges kábelek mennyiségét és elhelyezkedését.

Ez volt a tervezési feladat egyszerűbb része. A 11,25 méteres elempárok építését – amelyek súlya egyenként elérheti a 700 tonnát – az 1600 tonna súlyú segédhíd és a zsaluzatok



3. ábra • Egy szakasz építése szabadbetonozásos technológiával

teszik lehetővé. Egy pillérről jobbra és balra öt-öt szakasz készül el. A segédhíd a konzolpáron két, az előző szakaszon egy lábbal támaszkodik. A szerkezet továbbmozgatása során a támasztó lábakon, ún. *főtámaszokon* kívül segéd támaszokat is alkalmazni kellett. Egyszer a segédhíd felszerkezte mozgott előre a támasztó lábakon, máskor a segéd támaszokon nyugvó szerkezet alatt a főtámaszokat helyeztük át. Ezeknek a terheknek a pillanatnyilag már elkészült feszített vasbeton szerkezetnek erőtanilag meg kellett felelnie. Ugyancsak különleges terhek jelentkeznek, amikor a segédhidat az elkészült hídrésztől 60 méterre lévő következő pillérre át kell helyezni. A számítások során a feszítés mértékét az igények szerint ellenőrizni, szükség esetén módosítani kellett. Szükségesnek tartottuk, hogy a bonyolult szerkezet erőtanilag számítását független, nagy szakértelemmel rendelkező mérnöki szervezet ellenőrizze. Ez a cég, a Leonhardt, Andre und Partner, részletes számításban igazolta, hogy a tervezés helyes volt.

Mindenki természetesnek tartja, hogy egy híd olyan legyen, hogy a terheket megfelelő biztonsággal tudja viselni. Itt azonban jelentkezett egy, az építés módjából adódó további bonyolult feladat. Az építési mód ismertetése során látható volt, hogy itt a pillérektől két irányban épülő 60 m hosszú konzoloknak kellett az előzőleg megépült hídszakaszhoz pontosan csatlakozniuk. A konzolvég lehajlásának mértékét tehát ki kellett számítani. Minden szakaszt a saját súlyán kívül terhelte a segédhíd támaszainak különböző mértékű és helyzetű terhe, valamint azok továbbmozgatása során jelentkező tehercsökkenés hatása. Amikor elkészült a teljes konzolhossz, akkor kellett pontosan találkozni az előzőleg épült konzol végével. Ehhez azt is figyelembe kellett venni, hogy a három hónap alatt, amíg az új szakasz épült, a konzol végének magassági helyzete a hőmérséklet, az anyag zsugorodása és lassú alakváltozása miatt ugyancsak módosul. A bonyolult számításhoz az ilyen számítások elvégzésében nagy tapasztalattal



4. ábra • Az új hídág összekötése a korábban elkészült hídrésszel

rendelkező német Leonhardt, Andre und Partner tervező cég munkáját vettük igénybe. Az egyes szakaszok építése előtt a megadott helyzetbe kellett beállítani a zsaluzatokat. A szerkezet a beton terhetől lefelé, a feszítéstől felfelé mozgott. Minden fázisban mértük a ténylegesen megvalósult magassági helyzetet. Ennek alapján lehetett értékelni a helyzetet, és a következő szakasz beállítási helyzetét megállapítani. Ehhez a munkához a kivitelezés és a tervezés folyamatos nemzetközi kapcsolattrendszerben való működésére volt szükség. A résztvevők együttműködését, szakmai tudását az eredmény minősíti (4. ábra).

Az itt leírtak ékesen bizonyítják, hogy egy ilyen bonyolult műszaki feladatot csak a tervezők és kivitelezők egyidejű, közös munkájával lehet sikeresen elvégezni. Ennél a munkánál adva volt egy tapasztalt vezetők által irányított, egymást ismerő és egymást megbecsülő tervezői és kivitelezői csapat. Ennél a hídnál sok fiatal szakember is jelentős

feladathoz jutott. Feladatukat nagyszerűen oldották meg. Nélkülük ezt a sikert nem lehetett volna elérni.

*Az építési technológia változtatása.
Ok és következmény*

Amikor közeledtünk a felszerkezet építésének feléhez, szembe kellett nézni azzal, hogy a híd átadása a forgalom számára a kívánt határidőre erősen kétséges. Kerestük tehát a gyorsabb építés lehetőségét. Az első pillanatban nyilvánvaló volt, hogy csak akkor lehet az építési időt rövidíteni, ha a felszerkezet szakaszait nem a helyszínen zsaluzatban, hanem előre gyártva készítjük el. Ez esetben a szakaszok előre gyártását, felemelését és feszítését párhuzamos munkavégzéssel lehet végrehajtani (5. ábra).

Most már csak meg kellett találni az új technológia végrehajtásához az alkalmas szerkezeteket. Elsősorban olyan emelőszerkezetet, amely 650 tonnás elemeket akár 80 méter

magasságra fel tud emelni, pontos helyzetbe tudja állítani, és a beállított helyzetben tartani tudja mindaddig, amíg azt az előző szakaszhoz hozzá lehet feszíteni. Annak érdekében, hogy a híd felszerkezte minden pontján az eddigiekkel azonos kialakítású legyen, és a szakaszok csatlakozása pontos és folyamatos legyen, a szakaszokat hosszirányban két részre osztottuk. Az előre gyártott részt 1,5 méterrel rövidebb hosszban készítettük el, és amikor az elemet felemeltük, a már elkészült szakaszhoz csatlakozó 1,5 méteres hosszú helyszíni betonozással készítettük el.

Az elvekkel tehát eredményre jutottunk. De az ördög, mint tudjuk, a részletekben van elrejtve. Legalább öt változatot ajánlott a szerkezetet gyártó cég. Egyik sem látszott igazán jól alkalmazhatónak. Hosszasan vitatkoztunk. Mindenki tett javaslatot, amíg ki nem alakult a végleges, alkalmasnak ítélt megoldás.

Ezután a német cég átdisználta a segédhíd egyes részeit, biztosította az emelő sajtókat, és összeállt az új építési technológia. A felszerkezet erőtan számítását ismét el kellett készíteni, a vasbeton elemeinek tervét, a feszítőkábelek vonalvezetését át kellett tervezni. Ezt követően lehetett az elemek előre gyártását megkezdni. Az elemek gyártási helye a völgyben, pontosan a végleges, a hídban elfoglalt helyük alatt volt, mivel az emelőszerkezet kis beállítási korrekción kívül csak függőleges emelésre volt alkalmas.

Az új technológiára való áttérés nehéz elhatározást jelentett. Az eredetit már mindenki ismerte. Az új vajon fog-e működni? Mennyi idő alatt történik meg a szerkezetek átalakítása? Mennyi idő alatt tanuljuk meg alkalmazni? A költségtöbblet sem elhanyagolható. Bizony sok érintett szakember vonakodott a változtatástól. A cég vezetése azonban



5. ábra • Az új technológia alkalmazása előregyártott elemekkel



6. ábra • A modern dilatációs szerkezet

kiemelten fontosnak tartotta a szerződés teljesítését. Így a változtatás mellett döntött. A következő naptól az összes résztvevő, akár eredetileg támogatta, vagy nem igazán szerette, teljes erővel azon munkálkodott, hogy az új technológiára való áttérés eredményes legyen. Ez jelentette a siker egyik fontos tényezőjét.

A technológia váltásának eredményét, az építési sebesség növekedését, a következő adatok mutatják:

- Az eredeti technológiával: 14 nap alatt 45 m épült. Ez napi 3,2 m felszerkezet építése.
- Az új technológiával: 7 nap alatt 45 m épült. Ez napi 6,4 m felszerkezet építése.

Az útszakasz egy kényes pontja

A híd tartószerkezetén kívül foglalkozni kellett a híd és a töltés csatlakoztatásának megoldásával.

A hídtest csatlakozása az útpályához minden hídnál különös gondot jelent. A híd hossza a hőmérsékletváltozás hatására növekszik vagy csökken. Beton anyagú szerkezetnél még a zsugorodás hatására is változik, zsugorodik. A Kőröshegyi híd teljes hosszában egyetlen szerkezet. A számított mozgás több mint egy méter. A gondot ennek a hézagnak a méretváltozása jelenti. Elvárjuk, hogy a gépkocsik áthaladása viszonylag simán és kis zajjal járjon. Ugyanakkor elvárjuk, hogy az átmenet a vízzárást biztosítsa. Ennek hiányában a csapadékvíz átfolyik a felszerkezetről a hídfőre, és ott korróziós károkat idéz elő. Vagyis az átvezetés a megkívánt határon belül mozgó, mégis folyamatos és vízzáró legyen.

A Kőröshegyi völgyhídnál Magyarországon első alkalommal egy olyan, a német Maurer cég által gyártott, dilatációs szerkezetet építettünk be (6. ábra), amely ezeket az



7. ábra • A két hídfőtől épített szerkezet találkozása

igényeket minden eddigi szerkezethez képest magasabb szinten biztosítja. A felületen, az útpályasíkjában egymás mellett mozgó, fésűs elhelyezésű elemek biztosítják a gépkocsik zökkenő nélküli áthaladását, s ennek eredményeképpen az alacsony zajszintet. Ez alatt az ismert zárt, harmonikamozgást és vízzárást biztosító gumibetétes szerkezet helyezkedik el.

Epilógus

A híd megvalósításának előkészítése, tervezése, kivitelezése és az ellenőrzés munkájának eredményét mutatja, hogy a két oldalról épített 1872 m hosszú, középen csatlakozó híd-

szerkezet a tervezett időben, módon, teljes pontossággal valósult meg (7. ábra).

Ez az eredmény sok szakember és valamennyi közreműködő többéves, szívvel-lélekkel végzett munkájának, kitartásának köszönhető.

Kívánom, hogy az egész országnak annyi öröme teljen benne, mint nekünk, akik részt vettünk ebben a munkában.

Kulcsszavak: *feszítés, szabadbetonozás, pászmás kábel, záró zöm, ciklusidő, segédhíd, konzol, zsugorodás, lassú alakváltozás, szabadszerelés, dilatációs szerkezet*

NYOLCVAN MÉTERREL A FÖLD FELETT (A KÖRÖSHEGYI VÖLGYHÍD TERVEZÉSE)

Mátyássy László

vezérigazgató, Pont-TERV Zrt.
hidak@pont-terv.hu

1. Előzmények

Az M7-es autópálya építése a hetvenes években Zamárdi térségében abbamaradt, és csak a 90-es években jött szóba ismét a továbbépítés gondolata. Ekkor azonban az eredetileg elképzelt, Balaton-közi nyomvonalon az autópályaépítés engedélyeit már nem lehetett beszerezni. Így merült fel az a megoldás, hogy a nyomvonalat Köröshegytől délre, annak déli határa közelében jelöljék ki. Az első tervek elkészítésekor azonban kiderült, hogy ez a változat egy csaknem 1800 m hosszú völgyhíd megépítésével valósítható csak meg.

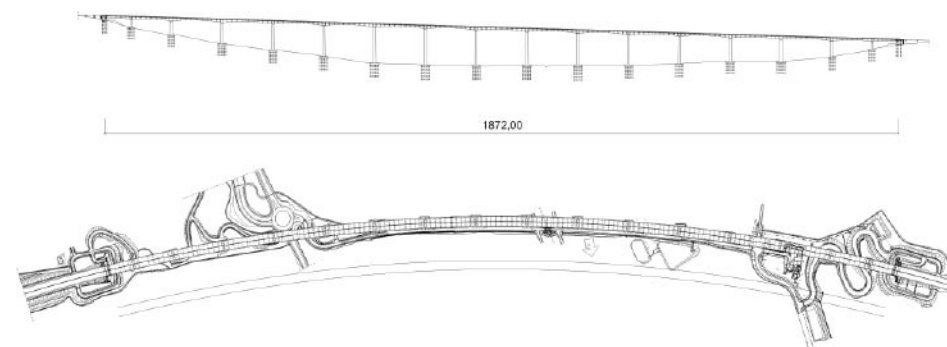
A magyarországi terepviszonyok között első pillanatban indokolatlannak látszó mű-

tárgy környezetéről útnyomvonal és híd tanulmánytervek egész sora készült. Több változat rövidebb műtárggyal vagy alagút építésével próbálta a drága és hosszú híd megépítését elkerülni, azonban ezek a megoldások szintén sokba kerülnek, vagy megvalósításuk esetén nem tarthatók az autópálya előírt paraméterei.

Az ebben az időszakban készült műtárgy tanulmánytervek különböző mélységben és szempontok szerint elemezték a szóba jöhető megoldásokat. Foglalkoztak többek között a megépítendő műtárgy szerkezeti kialakításával, anyagának megválasztásával, a híd és alagút megvalósíthatóságával és összehasonlításával, a híd szélességének megválasztásával,



1. ábra • A felszerkezet építésének látványterve



2. ábra • A híd általános terve

az építés módjával és esztétikai szempontokkal. Készült acélszerkezetű, majd feszítettbeton változat is.

Végül a kivitelezési pályázat során a feszítettbeton változat megvalósítása mellett döntöttek. Tekintettel arra, hogy a változatok nyílásbeosztásai az acélszerkezetű híd igényeihez alkalmazkodtak, a döntés után a híd hosszát módosítani kellett, hogy a feszített változat építési technológiájához jobban alkalmazkodó nyílásméreteket választhassunk. Így alakult ki a a felszerkezet végleges hossza, 1872 m, melynek támaszközei $60+95+13 \times 120+95+60$ m hosszúak.

A híd teljes hosszán az autópálya 4000 m-es vízszintes sugarú ívben halad, és a budapesti hídfőtől egyenletes, 2,86 %-os eséssel közelíti az országhatár felé. Leállósáv a hídon nem épül, az autópálya forgalmát $2 \times 2 \times 3,75$ m széles sávon vezeti át, a szegélyek mentén kívül 1,50 m, belül 1,00 m az oldalakadály-távolság. A völgy feletti legnagyobb magasság 87,85 m, a legnagyobb pillér magassága 79,70 m.

2. Alapozás, hídfők, pillérek

A Köröshegyi-völgy geotechnikai viszonyait az érintett szakaszon iszapos, homoklisztes, agyagos, helyenként márgás rétegek jellemzik. A Budapest felőli domboldal lejtőjén a talaj-

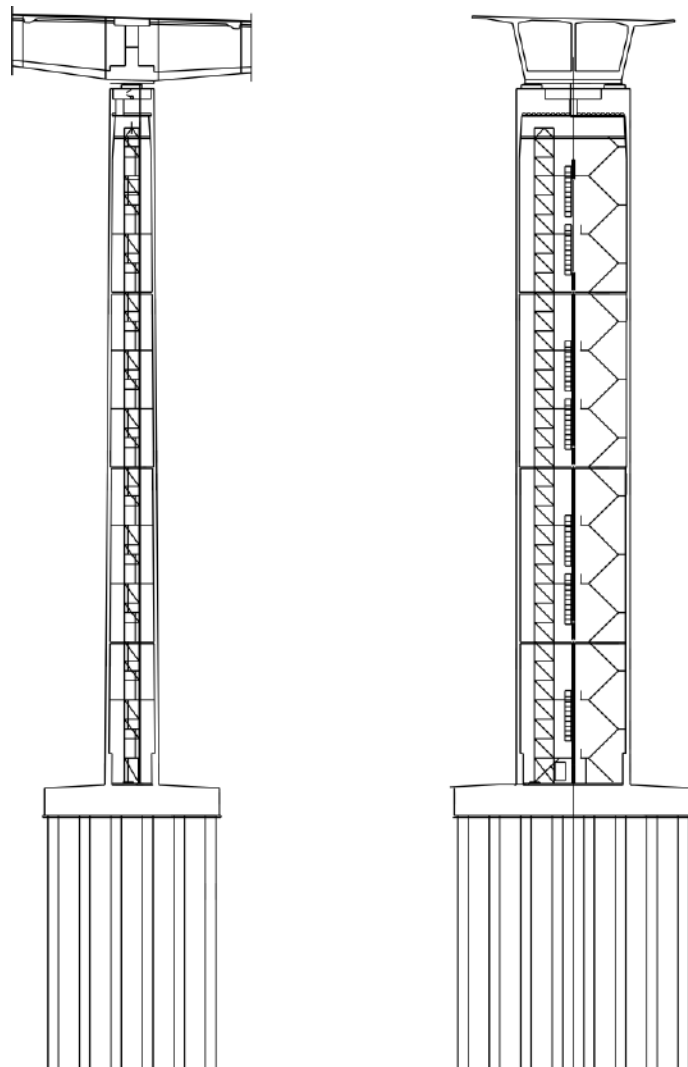
viszonyok valamivel kedvezőbbek, mint az országhatár felőli oldalon, a köröshegyi Séd lapos völgyében pedig a magas talajvíz és a felső rétegben lazább talajok találhatók. Előrendű igény volt, hogy a jelentős alapozási terhek következtében viszonylag kis süllyedési értékek lépjenek fel. A nagyatmárójú fúrt vasbeton cölöpalapozás a fenti igényeket maradéktalanul kielégíti. Az alkalmazott átmérő a hídfőknél 1,50 m, a pilléreknél 1,20 m.

A különleges méretű alapozás műszaki kialakítását és statikai vizsgálatát nem volt elegendő a hazai gyakorlatban eddig alkalmazott megoldások szerint tervezni. A hídfők, pillérek és a felszerkezet belső igénybevételeit és alakváltozásait komplex, a felszerkezet viselkedését és a talaj rugalmas befogását is tartalmazó modellen vizsgáltuk. A számításokban a másodrendű hatásokat is figyelembe vettük. A pillérek viselkedését földrengés hatására is vizsgáltuk. Különös gondot kellett fordítani a szerelés közbeni állapotok vizsgálatára is.

A vasbetonból készülő hídfők alapozásának tervezésénél figyelemmel kellett lenni arra, hogy a felszerkezet építés közben, egészen az utolsó zárásig a hídfőt fix támaszként vesszük igénybe. A sarusúrlódásból így keletkező vízszintes erő lényegesen meghaladja a használat közben keletkező igénybevételeket.

A térfalak mögött helyiségeket alakítottunk ki, melyek lehetőséget nyújtanak az elektromos, vízépítési és hírközlési szerelvények, valamint a belső közlekedés eszközeinek elhelyezésére, és a fenntartási munkák végzéséhez is segítséget nyújtanak. Az országhatár felőli hídfőben helyeztük el a csapadékelvezető rendszer gyűjtőmedencéjét.

A hídfők között 16 db pillér készült, melyek magassága a híd hossz-szelvényének és a terepviszonyoknak megfelelően különböző, 17,70 – 79,70 m között változik. A pilléreket a nagytérőjű fűrt vasbeton cölöpökre támaszkodó, lemez alaptestekre alapozzák. Az alaptestek méretei szokatlanul nagyok, 2 × 2 db 16,40 × 23,60 × 2,60 m méretű, 2 × 3 db



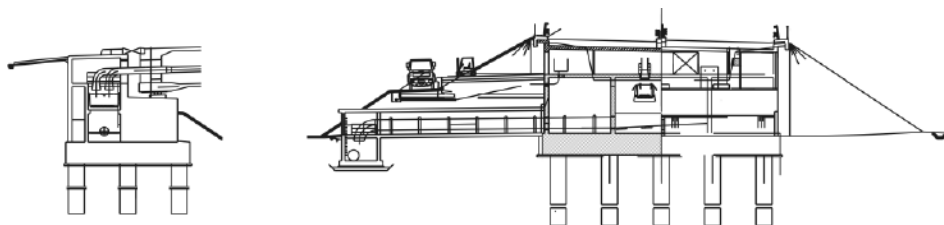
3. ábra • Pillér általános terve



4. ábra • Pillér építése kúszó szaluzattal



5. ábra • Előszertelt vasalás beemelése



6. ábra • Az országhatár felőli hídfő a vízgyűjtő medencével

20,00 × 23,60 × 3,50 m és 6 db 20,00 × 27,20 × 3,50 m méretű alaptest készül.

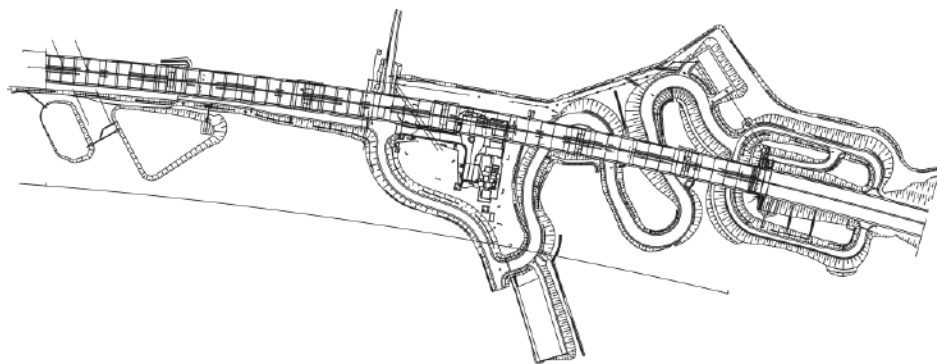
A pillérek kialakítása zárt szelvényű, kétcellás vasbeton szekrény keresztmetszettel, húszméterenként vízszintes diafragmával merevítve. A pillérek külső falai sík oldalúak, keresztirányban párhuzamosak, a hídtengely irányú oldalak enyhén ferde kialakítással. A falak a szerkezeti gerenda felé 1:140 hajlással közelednek egymáshoz. A pillérek ilyen kialakítását a falak építésének technológiája alapvetően befolyásolta.

A felmenő falak építéséhez kúszó zsaluzatot használtak. Az indító pillérszakaszok és a hozzájuk csatlakozó betonozási szakaszok változó magasságúak, feljebb azonban egyenletes 5 m-es szakaszok épültek. A falak vastagsága az indító szakasznál 80 cm, feljebb 45 cm, illetve 35 cm. A kiviteli és vasalási tervek készítésekor a technológia adottságaihoz al-

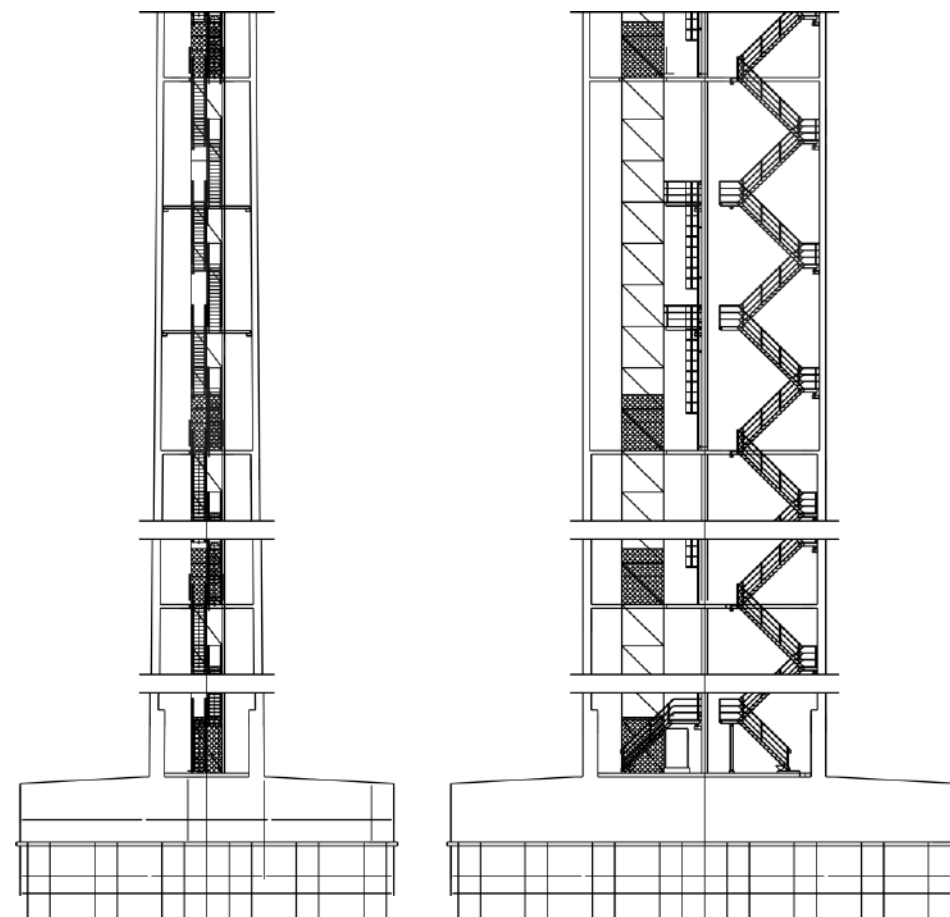
kalmazkodó megoldás született. Minden pillér felső részétől lefelé azonos kialakítású és vasalású betonozási szakaszok készülnek, lehetővé téve, hogy a falszakaszok előre gyártott vasalási elemekből készüljenek. Az egy-egy falszakasz méretű vasalási elemeket egyben emelhetik a helyükre, a sarkok összekapcsoló vasalását a helyszínen szerelik be. A vízszintes diafragmák előregyártott szerkezetűek, beemelés után helyszíni betonkapcsolattal, a kiálló vasalás segítségével, a falakkal összeépítve.

3. Az építés közbeni mérések jelentősége

A pillérek építése közben fokozott geodéziai ellenőrzést kell végezni. Ennek célja, egyrészt, a geometria pontos betartása, hiszen a tervtől való jelentős eltérés a számítottól nagyobb igénybevételeket okozhat. Legalább ilyen fontos azonban a süllyedések ellenőrzése és a mérések alapján a további várható alapsüllyedé-



7. ábra • Üzemi utak és a külső vízelvezető rendszer a tisztító medencékkel



8. ábra • A pillérek belső közlekedésének terve

sek meghatározása. Ennek alapján kell ugyanígy a felszerkezet magasságát beállítani, hogy a végleges állapotban a tervezett hossz-szelvényhez minél közelebbi eredményt kapjunk.

4. A híd kiegészítő létesítményei

Az 1872 m hosszú felszerkezet egy dilatációs szakaszként készül. A hőmozgás ebből eredő rendkívüli hatását tovább növeli a beton zsugorodásából és lassú alakváltozásából származó hatás, amely a hídfőknél együttesen elérheti az 1330 mm-es elmozdulást is.

A felszerkezet alátámasztására gömbsüveg felületű sarukat építettek be. A híd középső négy pillérén fix, a többi alátámasztásnál hosszirányban mozgó sarukat helyeztek el. A felszerkezetről átadódó nagy terhek miatt a szokásosnál nagyobb saruméretek adódnak, ebből következően a saruk beépítésének és a saruzsámolynak a tervezése is különös figyelmet igényelt.

Meg kell említeni a híd hosszából és a 2,86 %-os hosszszésséből származó érdekességet. Ha a híd két végén a saruk mozgó felüle-

tét a szokásoknak megfelelően vízszintesen építjük be, a dilatációs szerkezet mozgásával ezen a szakaszon a híd hossz-szelvénye jelentősen változtatná lejtését, ami az autópálya forgalmát veszélyeztetné. Ennek a hatásnak elkerülésére a saruk csúszó felületeit a pálya hosszúságával párhuzamosan helyeztük el, és az ebből adódó erőtan hatásokat az alépítmények számításánál figyelembe vettük.

A hídon elhelyezendő passzív biztonsági berendezéseknek is szigorú előírásoknak kell megfelelni. Az Állami Autópálya Kezelő Rt. a kocsi pályát két oldalán elhelyezendő közúti vezetőkorlátokkal kapcsolatban ütközési kísérletekkel igazolt ütközési fokozatok betartását írta elő. A két forgalmi pálya között H2, a híd külső oldalán H3, illetve a 6505 j. út felett H4 fokozatot írtak elő. Az üzemi járda külső oldalán 1,20 m magas, a kézlécen drótkötéllel erősített pálcsas korlát növeli a biztonságot.

A szerkezet rendkívüli méretei szükségesé tették, hogy külön foglalkozunk a belső üzemi közlekedés tervezésével. Valamennyi pillér és hídfő és rajtuk keresztül a felszerkezet megközelíthető a külső terepről. A híd alatt üzemi úthálózat készül, a pilléreknél parkolóval. A hídfők megközelítése az autópálya irányából épülő üzemi útszakaszon történhet, a hídfők mellett rakodórampát alakítottunk ki. A rakodórampán keresztül lehet az anyagokat a hídfő, majd a felszerkezet belsejébe juttatni.

A felszerkezet szekrényének mindkét cellájában üzemi járda épült, melyen 4 t össztömegű elektromos targonca közlekedik. A targonca személyek és terhek szállítására használható fel.

A pillérek belső megközelítésére valamennyi pillérben acélszerkezetű üzemi lépcsőház épült. A hídkezelői munka könnyítése érdekében a 6. és a 10. pillérekben felvonó létesült,

melynek segítségével a felső pódium könnyebben megközelíthető.

A híd belső világítása, a jelzőfények, a felvonó, a vízkezelés és -tisztítás szerelvényei, s az üzemi hírközlés elektromos energiát igényelnek. Az energiaellátás az üzemi út mentén lefektetett kábelon keresztül jut el a pillérekbe, majd a felszerkezetbe. A légiforgalom számára a hídon kétoldalt a hét legmagasabb pillér felett jelzőfényeket helyeztek el, karbantartásuk a híd üzemi járdájáról történik.

A hídon komplett villámvédelmi rendszer készült, melynek egyes elemeit már vasszerkezetkor, betonozás előtt el kellett helyezni.

A beépítendő közművek sorát a gyengeáramú rendszer egészíti ki, mely a híd belső hírközlését, a riasztóberendezést, a forgalmi és meteorológiai jelzésrendszer elemeit és a gépészet és elektromos berendezésekről érkező jelek továbbítását foglalja magába.

5. A híd vízelvezetési rendszere

Külön kell szólni a híd vízelvezetési rendszeréről, melynek megoldása a híd rendkívüli hosszúsága és magassága, valamint a pálya csaknem 3 %-os hosszúsága következtében különleges feladat volt.

A megoldás lényege, hogy a víznyelőkben összegyűjtött vizeket a szekrénytartó belsejében végigfutó csövekbe vezetik, majd az alsó, országhatár felőli hídfőben kialakított belső medencébe vezetik, ahonnan az a hídfő oldalán elhelyezett nagyatmértőű csövön keresztül azonnal távozik. A kivezető cső egy vasbeton műtárgy védelmében hagyja el a töltés vonalát, és zárt vezetékben egy vésztározó közbeiktatásával jut el a tisztító műtárgyakhoz. A tisztított vizek folynak azután bele a köröshegyi Séd-patak vizébe.

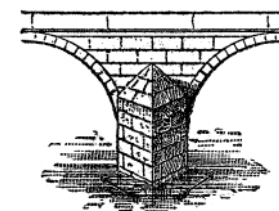
A gyűjtővezeték a szekrénytartó mindkét cellájában egy-egy 300, 400 és 500 mm-es

gömbgrafitos öntöttvas csőből épült. A befogadó medencébe 600 mm átmértőű rozsdamentes acélcső vezet be a vizeket, ahol energiatörő vályúk csökkentik a lezúduló víz energiáját.

A műtárgyban felhasznált betonmennyiségek: alapozásban 47 123 m³, az alépítményekben 17 749 m³, a szegélyekben pedig 3229 m³. Megrendelő: a Nemzeti Autópálya Rt., az

engedélyezési tervet a Pont-TERV Zrt., a kiviteli tervet a Hídepítő Zrt. és Pont-TERV Zrt. mint társtervezők készítették, a generálkivitelező a Hídepítő Zrt. volt.

Kulcsszavak: *feszítettbeton, tanulmányterv, geotechnika, alapozás, hőmozgás, ütközési fokozat, passzív biztonság, üzemi közlekedés, belső hírközlés, vízelvezetés*



Tanulmány

MEGJEGYZÉSEK A GLOBÁLIS FELMELEGEDÉSHEZ

Reményi Károly

az MTA rendes tagja
remenyi@energia.bme.hu

Gróf Gyula

PhD, BMGE
grof@energia.bme.hu

A megfelelő formában rendelkezésre álló energia az emberi civilizáció fejlődésének és fennmaradásának kulcskérdése. Aligha szükséges e kijelentés igazolásához bizonyítékokat felvonultatni. Az energiaigények kielégítését az energiatechnológiák állandó fejlődése a történelem során folyamatosan biztosította. Érdeemes emlékeztetni arra, hogy az energetika által okozott vitathatatlan környezeti hatások (például a CO₂-kibocsátás) nem az energiaipar öncélú működésének következménye, hanem annak, hogy az energetika valós civilizációs igényeket elégít ki. Kétségtelen, hogy közben a környezetre kedvezőtlen hatást is kifejt, ugyanakkor folyamatos erőfeszítéseket tesz azért, hogy a környezeti károkat mérsékelje. Így, mielőtt az energetika kerülne a vádlottak padjára, a civilizációs lét fenntartásában és a globális felmelegedésben betöltött szerepét tárgyilagosan kell értékelni. A *Megjegyzések a globális felmelegedéshez* egy hosszabb (negyvenoldalas) tanulmány összefoglalása, mely a jelenség mértékének előrejelzésére vállalkozó modellekkel, a felmelegedés mértéke körüli bizonytalanságokkal és az

ezekre alapozott intézkedésekkel foglalkozik. Az olvasó elé a fontosabb megállapításokkal és a felmelegedésre való felkészülés megkezdésének javaslatával állunk.

Alaptételek:

1. A Föld a világűrben termikus egyensúlyban van. A Napból kapott energiát teljes egészében visszasugározza a világűrbe.
2. A monumentális modellek eredményeiben igen nagyok az eltérések (a XXI. évszázadra 1,1–6,4 K felmelegedés, IPCC [Intergovernmental Panel of Climate Change]), nagyon bizonytalan intézkedéseket lehet ezekre alapozni.
3. A reális értékekhez való alkalmazkodás tervezése biztonságosabbnak látszik, mint az erőltetett megelőzés. Az energiaforrások eloszlása és a megújulóknak rejlő tényleges kapacitások determinálják a lehetőségeket.

A jelenlegi helyzet

Az egész világon a legnívósabb tudományos műhelyek, a politika és a társadalom elsőrendű témájává vált az éghajlatváltozás, és ezen

belül is a globális felmelegedés. Közvetlenül mindenki csak a saját lakóhelyének környezetében észleli a jelenségeket. Globálisan csak a Föld teljes megfigyelésének alapján lehet valamit megállapítani. Régióként van, ahol kedvezőnek érzik a változást, van, ahol kedvezőtlennek. A kérdés az, hogy minden tényezőt figyelembe véve a Föld egészére milyen hatások érvényesülnek, előnyök vagy előnytelenek. Vannak tények és van a prognózisvita. A tény kevés.

A legfontosabbak:

- az utóbbi kétszáz évben az átlaghőmérséklet emelkedett (közel 1 K),
- a légkör szén-dioxid-tartalma lényegesen emelkedett (280 ppm-ről 385 ppm-re).
- a jégmezőknél némi zsugorodás tapasztalható.

Tény azonban az is, hogy a prognózisok lényegesen eltérnek egymástól. Évszázadunkra 1,1 K-tól 6,4 K (IPCC) mértékű globális felmelegedés is jeleznek.

Bizony nem mindegy, melyik érték valósul meg. Az irodalomban a fő kiindulási adatok között igen nagy különbségek vannak. A Nap hőmérsékletére 5700 K és 6100 K között találunk értékeket. A Nap-állandóra 1270-től 1395 W/m² közötti értékek szerepelnek. Bizonytalan a felhők szerepe (a legfontosabb üvegházkomponens), az albedó (általánosságban az albedó egy felületre érkező elektromágneses sugarak visszaverődési képességének mérőszáma), a növényzet szerepe, a jégmezők és a tengermozgások folyamatai stb. Az „élő” Föld úgy tűnik, komplexen nem modellezhető (az eddigi világmodellek zátonyra futottak). A részletek modellezése ezután is hasznos információkat nyújthat. A globális vizsgálatokhoz ezután is – egyelőre – az egyszerűbb modellek a legmegbízhatóbbak.

A földi albedóval való számítás igen nagy

bizonytalanságot jelent. Átlagos értékét az irodalomban 0,2–0,3 között adják meg. Ezért célszerű máshonnan megközelíteni a légkör felmelegedését. A légköri hőmérséklet-változás a sugárzási viszonyok változása és az összetétel-változás oldaláról közelíthető a legegyszerűbben és legbiztonságosabban. A sugárzási viszonyok miatti felszíni felmelegedés jelenti számunkra az átlagos teljes felmelegedést. Ekkor benne foglaltatik az összetétel miatti változás is, ami a gázok sűrűsége és a fajhőjének változása miatt következik be.

A Föld termikus egyensúlyban van a világűrben, tehát ami a világútból (Napból) a Földre áramlik, az vissza is sugárzódik a világűrbe. Tulajdonképpen egy Föld-állandót is meghatározhatunk. A globális átlaghőmérséklet nem változik, csak a lég rétegek hőmérséklet eloszlása rendeződik át, a változások, például a CO₂-koncentráció növekedése következtében. A Föld-állandó értéke a műholdakról mért 255 K hőmérséklet alapján:

$$S_F = 5,67 \times 10^{-8} \times 255^4 = 239,74 \text{ W/m}^2$$

A CO₂-tartalom miatti fajhő és sűrűség okozta hőmérsékletváltozás a légkörben tárolt hőmennyiség állandó értéke alapján számítható, mértéke elhanyagolható, de nem növekedés, hanem csökkenés. A CO₂ a levegő oxigénjéből keletkezik, így a térfogat nem változik, de a tömegváltozás miatt a sűrűség igen.

A CO₂-koncentráció-változás miatt a ρ és a c_p változik, tehát a szorzatuk változását kell figyelembe venni a megváltozott ΔT kiszámításához.

A CO₂-koncentráció növekedése esetén ρ növekszik a CO₂ nagyobb sűrűsége miatt, a c_p csökken a CO₂ kisebb fajhője miatt. A ρc_p szorzat növekszik, mert a ρ jobban növekszik, mint ahogyan a c_p csökken. A tárolt hőmennyiség állandósága esetén a ρc_p növekedé-

CO ₂ -koncentráció (ppm)	(T) ΔT °C	lehűlés °C
350	33	0
450	32,997	-0,003
500	32,996	-0,004
600	32,994	-0,006

1. táblázat • A p_c változás miatti hőmérsékletváltozás, ahol ΔT – a 350 ppm CO₂-koncentrációhoz képesti koncentrációnövekedés miatt kialakult hőmérsékletkülönbség.

se miatt a légkör teljes tömegének átlaghőmérséklete csökken. A réteghőmérsékletek eltolódása következik be, a felsőbb rétegek tovább hűlnek, míg az alsóbbak hőmérséklete a sugárzási törvényektől vezérelve növekszik.

Az egyszerűbb modellel a légkör határán lévő egyensúlyi hőmérséklet számításával érzékeltethető, mennyire nem mindegy, milyen értéket veszünk fel, amikor következtessen alkalmazzuk a Stefan–Boltzmann-törvényt. A légkör határára számított egyensúlyi hőmérsékletnél az üvegházgázok még nem játszanak szerepet. A Föld felszínre felírt mérlegegyenletnél a Beer-törvény figyelembe vételével a légkörben lévő szén-dioxidot egyenértékű

gázréteggént kezeljük. Ez a feltevés az elnyelés esetében helytálló, a kisugárzásnál azonban a paraméterváltozásokat figyelembe kellene venni (az irodalmi modelleknel ennél sokkal erősebb közelítéseket is alkalmaznak).

A Föld felületére írva fel a mérlegegyenletet, a gázréteg közbeiktatása miatt magasabb hőmérséklet adódik. (2. táblázat)

Példaként kiválasztva egy reális értéket, jó prognózist kapunk.

Az CO₂-koncentráció 350 ppm-ről 500 ppm-re való növekedése maximum 1 K hőmérsékletemelkedést okozhat!

A Föld energetikai egyensúlyának a hőcserével mellett vele közel egyenértékű számos más összetevője is van. A modellek eredményei közötti nagy eltérés alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy a bonyolult modellekben a sok közelítés az összekapcsolásukat nem teszi lehetővé.

Részletes tanulmányunk számszerűleg bemutatja a felmelegedés szempontjából számba vehető legfontosabb folyamatokat és azok jelentőségét. A vitathatatlan, de egyszerűbb globális számításokkal kapott globális hőmérsékletemelkedés értéke, 1–1,5 K, nem elhanyagolható, de nem ad megoldhatatlan feladatot

$$S=1385 \text{ W/m}^2 ; T_e=279,5 \text{ K}$$

CO ₂ ppm	tömeg %	p-l m-bar	a _g Beer-együttható	ε _g	Te K
280	0,0425	2,17	0,65	0,114	287,8
350	0,053	2,7	0,69	0,122	288,6
450	0,068	3,5	0,736	0,13	289,4
500	0,076	3,9	0,755	0,133	289,6
600	0,091	4,64	0,785	0,138	290,1

2. táblázat • S – a napállandó W/m² • p-l – a Föld felületére redukált CO₂-rétegvastagság és a nyomás szorzata m-bar • a_g – a CO₂-rétegen áthaladó sugárzás intenzitásának gyengülése • ε_g – a CO₂ relatív emissziós tényezője • T_e – a Föld felületén a hőmérséklet, K

az emberiség számára. Ez alapján felkészülve koncentrálni lehet az emberiség számára legnagyobb problémákra, a szegénység felszámolására és az életszínvonal globális emelésére.

Tehát a szerzők által alkalmazott modellel – a szerzők véleménye alapján – a szén-dioxid-tartalom kétszeresre való növekedéskor száz év alatt a földi átlaghőmérséklet kb. 1–1,5 K-nel növekszik. Ez uralható változás, de fel kell készülni az ebből adódó következményekre!

Összefoglalás

Tanulmányunk végkövetkeztetéseként reális értékeket elfogadva, érdemesebb a nagy energiákat a változásokra való felkészülésre fordítani, és nem belehajszolni a világot egy finoman szólva is kilátástalan és óriási költségeket felemésztő CO₂-kibocsátás elleni küzdelembe. Új elveken alapuló energiafejlesztési módok segíthetnének!

Ki kell mondani, a megújulók (helyesen közvetlen természeti energiák! *direct natural energies*) csak segítenek, de megoldani a jelentős költségtöbblet árán sem tudják a problémát!

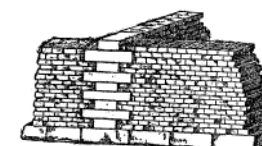
Lehetetlen és erkölcstelen elvárni, hogy a fejlődő országok polgárai (például: Kína, India stb.) ne igényeljék a jelen technikai színvonalnak megfelelő kulturált életszínvo-

nalat és kényelmet maguknak. Ezek a népek jelenleg fajlagosan az üvegházgázok egy tizedét bocsátják ki, a fejlett országok lakosai kibocsátásához viszonyítva. Energiaszükségletük növelését elsősorban fosszilis forrásokból (szén: World Energy Council, 2007. évi konferencia, Róma, november) tudják és fogják biztosítani.

Az üvegházgázmentes atomenergia jelenleg a világ primer energiájának mindössze csak 7 %-át fedezi, tehát jelentős növelése igen nagy tökeigény mellett sem nyújt megoldást (emelt a jelenlegi, általánosan alkalmazott technológiával az uránkészlet is csak hatvan–hetven évre elegendő!).

A globális felmelegedés korlátozását mindenekelőtt a CO₂-kibocsátás csökkentésével kívánják elérni. Ezek a próbálkozások ezideig kevés sikert mutatnak. A csökkentés megkezdését világviszonylatban már 1995-ben tervezték. Ebből semmi nem lett, de az ennél nemzetközileg jelentősen nagyobb súlyú Kiotói egyezmény óta sincs említésre méltó trendváltozás. Az 1997. december 11-én aláírt egyezmény óta eltelt tíz évben a szén-dioxid-tartalom kb. 355 ppm-ről 380 ppm-re változott.

Kulcsszavak: globális felmelegedés, szén-dioxid-növekedés



TÖPRENGÉSEK A VÍZRŐL

– lépésenként –

Somlyódy László

az MTA rendes tagja
BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék
somlyody@vkkt.bme.hu

Cianidszennyezés, rekord árvizek és a tiszai szabályozás újragondolása, belvízi elöntések, aszály és vízhiány, a Balaton vesztes vízvesztése és a sokak által követelt vízpótlás, éghajlatváltozás, a Rába habzása, a víz- és csatornadíjak égből emelkedése, az ivóvízellátás és a szennyvíztisztítás ezermilliárd forint nagyságrendű fejlesztése jelentik az elmúlt évtized legfontosabb hazai vízes híreit. A nagyvilágból riasztó jelzésekről hallunk: vesztes vízhiány sokfelé, az ivóvízellátás és szennyvízelhelyezés katasztrofális állapota, ijesztő csecsemőhalálozások a vízzel terjedő fertőzések következtében a fejlődő világban, a vesztesen öregedő vízi infrastruktúra, változatos szennyezések minden mennyiségben, természeti katasztrófák, mint a Szumátra közeli cunami vagy a New Orleans-ra lecsapó Katrina hurrikán, az Aral-tóhoz hasonlóan eltűnő vizek, a több országot lefedő nemzetközi vízgyűjtők konfliktusai és az éghajlatváltozás feltételezett – ma már nem is olyan váratlan – hatásai.

Mára közhelynek tűnik, de a víz az egyik stratégiai fontosságú, korlátozottan rendelkezésre álló, sérülékeny és jelentős gazdasági értékkel felruházott erőforrás, az élet, az egészség fenntartója, a gazdasági fejlődés előfeltétele és a természeti szépség forrása. Az aggasztó jeleket látva sokan gondolják azt, hogy az

olajkorszakot követően a 21. század válságát a semmi mással nem helyettesíthető víz jeleníti majd. A hasonlóságot alátámasztja, hogy a becslések szerint a víz-„biznisz” napjainkban az olajénak mintegy a felét teszi ki. De valóban vízválság fenyeget? Miben jelentkezik a víz kihívása? Melyek a tágabb értelemben vett kiváltó okok? Miben segíthet a tudomány?

Készletek és igények

A Föld globális vízkészlete közel állandó. Megújuló erőforrásként évente mintegy félmillió km³ víz lép a folytonos, nagy körforgásba és szállít magával sokféle más anyagot is. A teljes vízkészlet mintegy 2,5 %-a édesvíz, ezen belül a hasznosítható hányad csupán 0,6 %. A globális vízigény a megújuló készletnek töredéke, azaz az *első gondot* a térben és időben roppant egyenlőtlen elosztás jelenti. A kilencvenes évek végén a megújuló készlet fejenként átlagosan 6600 m³/év volt (Cosgrove and Rijberman, 2000), vízhiányos területenként azonban ez az érték nem haladta meg a né-

¹ Összehasonlításként ez az érték Magyarországon átlagosan 10 000 m³/év/fő körüli, míg csupán 600 m³/év/fő, ha az országon belül keletkező készletet tekintjük. A területi változékonyságot vizsgálva a Duna-Tisza köze és a Tiszántúl lényegesen kedvezőtlenebb helyzetben van, mint a Dunántúl.

hány száz m³/év/fő-t. Vízgazdálkodási szempontból fizikailag kritikus helyzetről vagy „stresszről” akkor beszélünk, ha a fajlagos vízmennyiség 1000–1700 m³/év/fő-nél kevesebb és ugyanakkor a kihasználtság 40–60 % feletti. A legnagyobb vízhasználatot (70 %) az öntözés teszi ki. A háztartások átlagos fogyasztása 10 % alatti,² az ipar pedig 20 % körüli.

A *második gond* a globális népesedés változatlanul exponenciális növekedéséhez kötődik, amely túlzott mértékű termeléssel és fogyasztással párosul.³ Aligha gondolta volna bárki is a századfordulón, hogy a Föld népessége a millenniumig 5 milliárddal fog nőni, majd 2025-ig elérheti a 8 milliárdot (ezzel az átlagos fajlagos vízkészlet 4800 m³/év/fő körüli értékre csökkenhet). A szaporodás a fejlődő világot jellemzi és megatrendként fokozza a már ma is nagy társadalmi és gazdasági különbséget Észak és Dél között. A vízhasználatok a népességnövekedéshez viszonyítva közel kétszeres mértékben nőttek. Becslések szerint a növekedés 1980 és 2000 között 80 % körüli volt (Shiklomanov, 1999).

A Föld népessége különböző mértékben küszködik az elégtelen mennyiségű vízből adódó gondokkal. Az 1990-es évek elején a lakosságnak 4–6 %-a élt stressz alatt (de például gazdasági okok miatt mintegy 20 % nem jutott biztonságos ivóvízhez), elsősorban a Közép-Keleten és Észak-Afrikában (Kulshreshtha, 1993). Itt a fejenkénti készletek évente nem haladják meg a 200–300 m³-t (a legrosszabb helyzetben Egyiptom és az Egyesült Arab Emírátsok található). Az elemzések szerint a készletek és az igények eloszlása-

nak egyenlőtlensége elsősorban az éghajlatváltozási hatások miatt növekszik, és 2025-re, a szegény afrikai és ázsiai térségekben a lakosság fele élhet inszért körülmények között (Kulshreshtha, 1993, Cosgrove and Rijberman, 2000). A készletek igen szűkösek Észak-Kínában és Dél-Ázsiában is, ahol az elmúlt fél évszázad változásai rendkívül kedvezőtlen trendet mutatnak. A tágabb térség fejlődése globális léptéken befolyásolhatja a vízdilemmát. A becslések bizonytalanok, azok nagymértékben függenek a különböző forgatókönyvek feltevéseitől, beleértve a gazdaság alakulását, az éghajlatváltozás készletekre és igényekre gyakorolt hatásait, valamint a technológiai fejlődést.

Városiasodás, ivóvízellátás és szennyvízelhelyezés

A probléma – az elsősorban a fejlődő országokra jellemző – városiasodás miatt felerősödve jelentkezik (Varis and Somlyódy, 1997). Ez jelenti a *harmadik gondot*. A városi lakosság száma 1970 és 1990 között megduplázódott és 2025-re elérheti az 1975. évi teljes népességet, miközben a vidéken élők száma stabilizálódni látszik. A gyorsan növekvő városok (Afrikában és Ázsiában a városi népesség a következő 25 év során megkétszereződhet) infrastruktúrája átláthatatlan, alig tervezhető és képtelen követni az igényeket. A következmények a felszín alatti vizek túlzott mértékű kihasználása (Pekingben például 1950 óta a talajvízszint csökkenése 50 m körüli, ma mintegy 40 000 kút termeli ki egyre mélyebbről a vizet⁴) és elszennyeződése, a járványok nagy száma Afrikában és a Közép-Keleten, az

² Ma a fejlett világban a napi lakossági vízfogyasztás 100 l/fő és 150 l/fő között található (a biológiai és a higiéniai minimum 2–5 l/fő/nap illetve 50–70 l/fő/nap).

³ Főemlős bakteriális szaporodási rátával? Melyek az ökológiai következmények?

⁴ A megállapítás a nagy öntözési vízigény miatt Kína sok területére érvényes. Másik példa a Közép-Kelet térsége, de említhetjük Indiát is, ahol szintén az öntözés vezetett nagyléptékű környezeti problémákhoz.

esővizek levezetésének hiánya és az árvizekkel szembeni kiszolgáltatottság (a városi elszívás és vidéki tasztítás másik gyakori oldala az elszegényedő vidék, a növekvő öntözés a városi táplálkozási igények teljesítése érdekében és a fokozódó szikesedés). Jelenleg több mint 1 milliárd ember él biztonságos ivóvízellátás, és 2.6 milliárd megfelelő szennyvízelvezetés nélkül (a *negyedik és az ötödik gond*, WHO, 2004). A fejlődő világ lakosságának a fele szenved különböző, vízzel terjedő betegségektől: évente közel kétfélmillió, öt évnél fiatalabb gyermek az áldozata az ivóvízellátás és a szennyvízelhelyezés megoldatlanságának (WHO and UNICEF, 2004). A WHO (2004) szerint Ázsiában, Dél-Amerikában és a Szub-Szaharai Afrikában a szennyvizek 65 %-a, 86 %-a, illetve 100 %-a marad tisztítatlan és ez az arány jelentősen nőni fog, hacsak az ENSZ millenniumi célkitűzéseit nem sikerül teljesíteni.

Járványok és meglepetések (1)

*Tífusz, kolera, hepatitisz és társai, a fejlett világban a múlt század második fele óta a vízellátás, csatornázás és szennyvíztisztítás által megoldottak hitt problémák (Somlyódy, 2002). Napjainkban, a harmadik világban 25 millióra tehető az évenkénti halálozások száma, az öt év alattiak elhalálozásának kétharmada pedig a vízzel terjedő járványoknak tudható be. A születési elhalálozás és a biztonságos ivóvízellátás szorosan összefügg: számos olyan fejlődő országban, ahol az ellátás csak 10 % és 40 % közötti (például Afganisztán, Angola, Etiópia, Banglades, India, Tanzánia) a mortalitás 12 % feletti. Az elmúlt évek során járványokról jelentettek több közeli országban is (Románia, Ukrajna stb.). Az Egyesült Államokban, 1993-ban, Milwaukee-ban a *Cryptosporidium* parazita által kiváltott járványt észlelték: több mint 400 000-en betegedtek meg és 54-en haltak meg. Az ehhez hasonló egysejtű*

parazitáknak más az életciklusa, mint a baktériumoknak, és spóráik nagyon ellenállók a tradicionális fertőtlenítési eljárással (klórozás) szemben. A felszín alatti vizekben is előfordulhatnak. Fertőzött élelmiszerek révén is terjednek a globalizálódó világpiacon. A Milwaukee-i eset alapvetően változtatta meg a szemléletünket az ivóvízellátásban: a járvány annak ellenére tört ki, hogy az összes előírást betartották. Rájöttünk, hogy „teljes” biztonság nem létezik, és alapvető a kockázati szemlélet bevezetése. Tudjuk, mi minden lehet még a vízben?

Az ENSZ 2015-re – 1990-hez viszonyítva – a biztonságos vízellátásban és szennyvízelhelyezésben nem részesülő népesség felezését tűzi ki ambiciózus célként. A 2002-es értékelés azonban több mint aggasztó (WHO and UNICEF, 2004). A vízellátás globális lefedettsége ugyan 83 % (a fejlett világban gyakorlatilag 100 %), ugyanakkor azonban a népesség miatt 1,1 milliárd ember változatlanul ma sem részesül biztonságos ellátásban. A szennyvízelhelyezés fejlődése elmarad a 2002-es céltól (58 % a 62 %-kal szemben): a jelenlegi trend mellett 2015-ben legalább annyian élnek majd szolgáltatás nélkül, mint 1990-ben. A jövő nem tűnik túl biztatónak.

Szennyezési problémák

A főbb vízminőségi problémákat – az elmúlt 150 évre visszatekintve – a felismerésük időrendi sorrendjében sorolhatjuk fel: járványok és a patogén baktériumok és paraziták által előidézett megbetegedések (Keret 1), az oxigénháztartás felborulása a nagy szervesanyagterhelés következtében, a felmelegedett hűtővizek okozta hőszennyezés, a túlzott tápanyagfeldúsulás által kiváltott eutrofizálódás, a szervetlen és szerves perzisztens mikroszennyezők, amelyek alacsony, µg/l-nyi koncentrációban fejtik ki toxikus és esetenként rák-

keltő hatásukat (évente több ezer ilyen vegyület szintetizálnak és forgalmaznak), a felszín alatti vizek elszennyeződése (nitrát, szulfát, peszticidek, valamint a hulladéklerakókból származó különböző anyagok), a savasodás, az éghajlatváltozás és a globalizáció szerteágazó következményei.

Vizsgálataink szerint (Somlyódy, 1995, Somlyódy and Varis, 2006) a főbb trendek az alábbiak:

- a problémák léptéke nő a lokálistól a globális irányába;
- Az üledék, a talaj és a talajvíz elszennyeződése következtében az ok-okozati hatások, továbbá a beavatkozások eredményei csak számottevő késleltetéssel jelentkeznek;
- Adott helyen sok, egyidejű, eltérő jellegű és egymásra kölcsönösen ható problémát kell orvosolni;
- Folyamatosan számolnunk kell meglepetések felbukkanásával. Ilyen az említett *Cryptosporidium* járvány (*első keretes szöveg*), az éghajlatváltozás hatásai, a közlekedés javulása miatt a járványok nagymértékű és gyors potenciális terjedése a világban, az egészségügyi gondok megjelenése alga toxinok, szerves mikroszennyezők, szintetikus szteroidok, gyógyszermaradványok, természetes hormonok és kozmetikumok és más, a hormonháztartást befolyásoló anyagok miatt.⁵ Valójában a fejlett világ egyik legkomolyabb problémáját ezek, a gyakran alig detektálható ppt (parts per trillion) mennyiségben és ismeretlen összetételben előforduló nanoszennyezők okozhatják (*második keretes szöveg*). Egészségügyi és ökológiai

⁵ Itt említendő az óriási lehetőségeket rejtő nanotechnológiai módszerek velejárójaként a várhatóan növekvő mennyiségben környezetbe jutó nanorészecskék egyelőre ismeretlen hatása, amennyiben a kapcsolódó ipar nem jár el kellő elővigyázatossággal.

hatásaik feltáratlanok. Többségükre a hagyományos víz- és szennyvíztisztítási módszerek nem adekvátak, és gyakran élelmiszeripari termékekben is hasonló anyagokat találhatunk, azaz az expozíciós utak ismeretlenek;

- e. A pontszerű szennyezések tisztítással történő szabályozásával világszerte a csapadék által a földről, városi burkolt útfelületekről lemosott ún. diffúz szennyezések váltak dominánssokká (például a Duna vízgyűjtő esetében a tápanyag-emissziók 70-80 %-a ilyen jellegű). A nem-pontszerű szennyezések kezelése alapvető szemléleti változást igényel, hiszen szabályozásuk nem lehetséges a földhasználat átgondolása, továbbá a bioszféra két másik elemének, a talajnak és a légkörnek a bevonása nélkül: a különböző anyagok vándorlását a hidrológiai körforgással együtt kell nyomon követni. A „hogyanra” még csak keressük a receptet.

Napjainkban (2)

Szintetikus szteroidokat (nemi hormonokat) széles körben alkalmaz a gyógyszeripar. Ezek ellenőrizetlen módon, jelentős mennyiségben jutnak a szennyvizekbe a fogamzásgátló tablettákat használó nők által kiürített szteroidokkal együtt. Újabban kimutatták, hogy a szintetikus szteroidokat a szennyvizet tisztító baktériumok aktiválhatják: angliai folyókban azt találták, hogy nagyobb városi szennyvíztelepek közelében a halak normális ivararánya jelentősen eltolódik a nőstények felé (a halaknál az ivari determináció nem feltétlenül genetikai, hanem hormonális). Azon szinte még találgatni sem tudunk, hogy milyen lehet az ivóvizek szteroidtartalma és okozhatja-e az emberi genitális daganatok arányának növekedését. Nyugtalanító.

A fenti eszmefuttatásból kitűnik, hogy gyakran kissé pongyolán beszélünk a vízprob-

lémák globális jellegéről. Valójában a gondok két nagy osztályát célszerű megkülönböztetni. Az elsőbe tartoznak az üvegházhatású gázok mennyiségi és minőségi, valamint a globális közlekedés már említett hatásai. Szintén ide sorolhatók a globalizálódó élelmiszer-kereskedelem határokön átnyúló következményei: az EU sok országában forgalmazott „mosolygós” és ízetlen paradicsom természetesen például Portugáliában, Spanyolországban, vagy a marhahús előállítása Brazíliában és Argentínában vezethet vízhiányhoz (érdemes megjegyezni, hogy például 1 kg paradicsom, gabona és marhahús előállítása mintegy 0,3, 1-4, illetve 16 m³ vizet igényel – utóbbi negyed-évnvi ivóvízfogyasztásunkkal egyenértékű^(6,7)). A második, nagyobb csoport a globálisnál kisebb léptékű *univerzális* problémákat tartalmazza, amelyek a Földön – a helyi körülményekről is függően – alapvetően mindenütt hasonlóan fordulnak elő. Ez a sokszínűség teszi a vízdilemmát nehezzé: az nem kezelhető egyetlen egységes stratégiával.

A szennyezések hatásai jelentik a *hatodik problémát*: gátolják, megdrágítják vagy megakadályozzák a kívánatos vízhasználatokat. Veszélyeket és hosszabb távon jelentkező károkat idézhetnek elő.

Szélsőségek és éghajlatváltozás

A *hetedik pofont* az árvizek és aszályok képezik. Szélsőséges események, a hidrológiai körfor-gás változékonyságának a következményei, amelyet az éghajlat- és a területhasználat válto-

zásai (*harmadik keretes szöveg*) számottevően befolyásolhatnak. Az árvizek a természeti katasztrófák kategóriájába tartoznak. Komoly kockázati tényezőt jelentenek és óriási gazdasági veszteséghez vezethetnek. Az aszályok egyrészt növelik a vízigényeket, másrészt a vízhiány miatt korlátozzák a vízhasználatokat, elsősorban az öntözést. A károk számottevőek lehetnek a mezőgazdaságban, az energia-termelésben, a turizmusban és más szektorokban. Mindkettő a többi vízgazdálkodási és környezeti gonddal együtt jelentkezik.

Az éghajlatváltozás hazai hatásairól (3)

Az Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2007. évi jelentése szerint 90 %-os valószínűséggel állítható, hogy megéljük az emberi hatások által előidézett éghajlatváltozást. A European Environmental Agency húsz feletti indikátor elemzése alapján jut hasonló következtetésre. Valójában a víz jelenti az éghajlatváltozás által legerősebben befolyásolt erőforrást és szektort. Az éghajlatban várható, de bizonytalanul előrejelezhető változások igen meglehetőséggel a hosszú távra szóló vízgazdálkodási tervek kidolgozását. A vizsgálatok szerint Magyarország klímája valószínűleg mediterrán irányba fog eltolódni, magasabb átlaghőmérséklettel, kevesebb nyári csapadékkal, ennek nyomán kisebb felszíni lefolyással és felszín alatti vizeket tápláló beszivárgással, és növekvő szélsőségekkel. Az egyik fontos következmény tehát, hogy kevesebb víz áll majd rendelkezésre az igények kielégítésére, különösen az öntözés számára. A tél végi, tavaszi árvizek hamarabb és az intenzívebb olvadás miatt növekvő csúcsokkal érkehetnek. A tavak vízforgalma átalakul, és várhatóan csökken a felületük, növekszik a tartózkodási idő és a sótartalom. Az oxigén- és a tápanyagháztartás ugyancsak kedvezőtlenül változhat. A szárazföldi ökoszisztémákban növekedhet a szárazságtűrő fajok aránya. Stratégiai szempontból az éghajlatváltozás hatásai olyan „külső”, kedvezőtlen elemek, amelyek a meglévő

problémákra szuperponálódnak, különösen a Tisza völgyében, ahol már eddig is gyakran jelentkeztek vízhiányos időszakok. Ezért a jövőben több figyelmet kell fordítani a várható hatások elemzésére, és célszerű rugalmas, különböző változatokat tartalmazó terveket készíteni.

Víz és változás

A biztosítótársaságok 1988 és 1997 között a Földön mintegy 6000 természeti katasztrófát regisztráltak, amelyek 35 %-a volt árvíz kétszáz ezer feletti áldozattal (az érintett lakosok száma 2 milliárd feletti). A károkat 300 milliárd dollárba teszik. A 20. század utolsó évtizedét húsz országban jellemezte rekord árvíz, így Ausztráliában, Bangladesben, Indiában, Kanadában, Kínában, Szomáliában, az USA-ban és sok európai országban. Az öreg kontinensen mintegy 100 jelentős árvíz pusztított. 4000 halálesetről tudunk. A szélsőséges események száma – úgy tűnik – gyarapszik. Ezt az elmúlt évek közép-kelet-európai eseményei is alátámasztják, de például 2003-ban sok latin-amerikai ország szenvedett árvízről és/vagy aszályról. Nyugat-Ázsiában hét éves aszályt rendkívül csapadékos időszak követett 2002-ben és 2003-ban, és okozott súlyos árvizeket.

Az éghajlatváltozás sokoldalú kihívást jelent. Hidrológiai elemzések szerint (Shiklomanov, 1999) nagyobb változásokat idéz elő a szélsőségekben, mint az átlagokban és a szezonális változásokban. Más szóval, a növekvő legnagyobb árvizek és a szaporodó, súlyos aszályok egymást nem kizárva fordulhatnak elő. Ugyanakkor a biztonságosan felhasználható készletek mennyisége csökken és kihasználtságuk is kedvezőtlenül változik. Ezek komoly gazdasági és ökológiai következményekkel járnak, és az árvízi szabályozás, a tározás és az öntözés együttes újrarendelését igényli.

Az éghajlatváltozás bizonytalanságainak kezelése átfogó kutatásokat igényel. Azonban a gyakorlati feladatok megoldása aligha várhat ezek kikristályosodott eredményeire: elkerülhetetlenek a bizonytalansági és érzékenységi elemzések. Ezekhez alapvető a jó indikátorok kiválasztása, amelyek kis változásokra nagy érzékenységgel válaszolnak. Ilyen például folyók esetében a legnagyobb vízszintek és vízhozamok változása, vagy az árvízi kitettség, tavak esetében pedig a természetes vízkészlet (csapadék + hozzáfolyás - párolgás) változása, amelyet a Balaton vízpótlásának vizsgálatánál használtunk sikerrel (*negyedik keretes szöveg*), egyúttal módszertani receptet is nyújtva.

A Balaton vízpótlása: tenni vagy nem tenni? (4)

2000 és 2003 között négy rendkívül aszályos év követte egymást. A rendszeres megfigyelések megkezdése óta 2001-ben először vált a tó természetes vízkészletváltozása (TVK) negatívvá, ami a következő két évben megismétlődött. A tó átlagos készletének közel egyharmadát veszítette el. A kellemetlen jelek magukban foglalták a strandok degradálódását, a makrofitonok és a mederhez kötött algák elszaporodását a partközeli sávban és a kikötők navigációs nehézségeit. Kiváltó okként felmerült az éghajlatváltozás valószínű hatása, és általános aggodalom volt megfigyelhető. Sokan vízpótlást javasoltak a Rábától vagy más vízgyűjtőről. Az elvégzett sokoldalú elemzések három pilléren épültek (Somlyódy, 2005, Somlyódy and Honti, 2005): (a) megfelelés az EU egységes vízpótlási politikájának, az ún. Víz Keretirányelvnek (VKI), (b) az elővigyázatosság elvének alkalmazása és (c) az éghajlatváltozás potenciális hatásának figyelembevétele forgatókönyvek segítségével. A következtetések a vízpótlás elvetését javasolták, mivel (i) a tó ökológiai állapota a nyílt vízen és a parti sávban egyaránt jó maradt, (ii) a tó pozitív vízmérlege és a kifejlesztett sztochasztikus

⁶ Házi feladat lehet az ökológiai lábnyom mintájára a „családi vízgyűjtőterület” becslése, ami a csapadékból lefolyás révén a közvetett vízfogyasztás fedezéséhez szükséges (hazai viszonyok között 1 kg marhahús mintegy 100 m²-rel egyenértékű).

⁷ A sokat vitatott bioetanol előállításához a növénytermesztés igényén túl 1-enként 2 l többletvíz szükséges.

vízháztartási modell alapján igazolható volt, hogy a tó egy-két éven belül még éghajlatváltozás esetén is feltöltődik és (iii) a vízpótlás számos megengedhetetlen ökológiai kockázattal járna. A vizsgálatok rámutattak arra, hogy a kérdéses aszályos időszak mintegy 200 évenként egyszer fordulhat elő, azonban a feltételezett éghajlatváltozási forgatókönyv esetén – miután a hatások a TVK mindhárom elemét kedvezőtlenül befolyásolják – az esemény akár 30-40 évenként is bekövetkezhet. A kutatások egyúttal javasolták a vízszintszabályozási rend felülvizsgálatát és a Sió csatorna levezető kapacitásának növelését medertisztítás révén, azért, hogy az alacsony vízállások elkerülése érdekében hosszabb ideig tarthassanak magasabb vízszinteket (a felülvizsgálatra mindmáig nem került sor). A megfigyelések igazolták a számításokat: 2005 elejéig a feltöltődés a becsült tartományon belül, közelítően a várható értéknek megfelelően következett be (Somlyódy, 2005). Hogyan cselekszünk, ha még alacsonyabb vízszintek alakulnak ki?

A döntésekhez integrált elemzésekre és okos döntéstámogató rendszerre van szükségünk. Ilyen például a Tisza új árvízszabályozási stratégiájának kidolgozására alkalmazott ARES 1.0 rendszer, amely többek között a hidrológia és hidrodinamika egy- és kétdimenziós fizikai egyenleteire, digitális topográfiai modellre, ürfelvételekre, távérzékelésre, térinformatikára és gazdasági elemzésekre épít (BME VKKT, 2003). Segítségükkel lehetővé válik nagyszámú alternatíva vizsgálata és az esetleges hibás döntések kockázatának mérlegelése, valamint robusztus, rugalmas és adaptív megoldások kijelölése.

Nemzetközi vizek és konfliktusok

A víz hagyományosan számos gazdasági, társadalmi és emberi konfliktus forrása. A víz lehet háborúk kiváltója és háborúk alatt mindig fontos stratégiai szerepet tölt be (az

iraki háború egyik legnehezebb logisztikai feladatát a sivatagban lévő félmillió katona vízellátása jelentette). A nemzetközi konfliktusok elsősorban a több országhoz tartozó vízgyűjtőkhöz kapcsolódnak. A Föld népességének a fele él ilyen területeken (Jordán, Gangesz, Nílus, Zambézi, Amazonas, Duna, Tigris–Eufrátesz, Rajna stb.): a vízgazdálkodás javítása az osztott vízgyűjtőkön a 21. század nyolcadik kihívása. Sok más területhez hasonlóan ennek sincsenek történelmileg kidolgozott, társadalmilag elfogadott hagyományai: a politikai, intézményi, pénzügyi és ellenőrzési feltételek nem állnak rendelkezésre, a nemzetközi szervezetek pedig tartózkodnak a konfrontációktól. A kérdéses területen Európa mutat talán számottevő előrelépést: a hivatkozott EU VKI (ötödik keretes szöveg) a vizek jó ökológiai állapotát tűzi ki egységes elérendő célként, vízgyűjtő-gazdálkodási tervek megvalósítása révén és a tervezés során a nemzetközi vizekre előírja az érintett országok egyeztetési kötelezettségét. A megvalósítás, úgy tűnik, erős politikai akarattal párosul.

Hab a Rábán (5)

A Rába Ausztria délkeleti, vizekben igen szegény részéről érkezik, ahol mind a hasznosítása, mind a terhelése intenzív: a vízgyűjtőjén 75 kommunális és 8 ipari szennyvíztelep található, az ipar-telepeken három helyen börtgyártás folyik. A folyó habzását először 2001-2002-ben, Szentgotthárdnál, és 140 km-rel lejjebb, Nicknél, valamint Ausztriában Fehring közelében figyelték meg. A rapszodikus jelenség széleskörű aggodalmat váltott ki, annál is inkább, mivel a szakemberek sem tudtak rá kielégítő magyarázatot adni. A 2005-ös magyar értelmezést, miszerint a habzásban a három börtgyár lenne a ludas, az osztrák partner elhárította, de végül mégis elindított egy kutatási programot.

A habot a folyadékban diszpergált gáz hozza létre, ha abban habzásra hajlamos anyag található. A Rába esetében a „habverőt” a három bukólduzzasztó alatti gomolygó vízmozgás helyettesíti. A feltevések szerint a jelenséget esetünkben a szintetikus aromás szulfonátok, a mosószer-ek fontos összetevői idézik elő, amelyek csökkentik a víz felületi feszültségét. A Rábánál a naftalinszulfonát gyűjtőnevi, illetve azon belül a naftalindiszulfonát, biológiailag alig lebomló vegyület, az egyik legismertebb cserzőszer keveredett gyanúba. A bécsi Műegyetem kutatásai bizonyították a kapcsolatot az ausztriai börtgyárak kibocsátása és a magyarországi habzás között, de ugyanakkor azt is, hogy a habzás nem írható egyetlen vegyület számlájára, hanem az sok anyag szinergikus hatásának az eredménye. Kimutatták azt is, hogy a habzás alacsony vízállások mellett (átlagosan az év 40 %-ában) mindaddig bekövetkezhet, amíg a „bűnös” vegyületek kibocsátását számottevően nem csökkentik. Technológiai szempontból a habképző anyagok eltávolításának egyik megoldása a szennyvíz speciális, többlepcsős fizikai-kémiai utótisztítása. Ezzel az eljárással, a 2007 nyarán elvégzett feldolgozó nagyléptékű kísérletek alapján a potenciális habzás időszaka évente néhány napra rövidülhet.

A Rába-probléma két EU-tagállam ritka konfliktusa, amelyet a nemzeti és az európai jogszabályi keretek között kell megoldani, akkor is, ha a habzás olyannyira ritkán jelentkező jelenség, hogy szabályozására egyetlen ország sem rendezkedett még be. Mindezek a tényezők – a probléma szakmailag feltáratlan voltaival együtt – közel öt éves tárgyalási pátthelyzetet hoztak létre, miközben a Duna-konvenció operatív szervezete és az EU távolról sem akart az ügybe belekeveredni. Az osztrák fél – jogilag megalapozottan – arra hivatkozott, hogy mindegyik börtgyár betartotta a hatályos környezeti előírásokat. A 2007-es áttöréshez végül politikai tényezők is hozzájárultak: a köztársasági elnök és a környezetvédelmi és vízügyi miniszter határozott fellépése, a mindkét oldalon aktivizálódó zöldszervezetek, de nyomott a latban a fokozódó negatív osztrák társadalmi

megítélés és a két legnagyobb börtgyárban a környezeti hatásokra érzékenyebb menedzsment megjelenése is.

Hol tartunk ma? A kétoldali akciós csoport 2007. őszi zárójelentése cselekvési programot határozott meg. Ennek legfontosabb elemei a felületi feszültségre vonatkozó kibocsátási határérték már megtörtént, úttörő jogszabályi előírása börtgyárakna, az utótisztítás megvalósítása 2008 és 2010 között, a monitoring program kölcsönös fejlesztése, szigorú ellenőrzés, tájékoztatás és a határvízi folyó vízgyűjtő gazdálkodási tervének közös kidolgozása is. De azt is látni kell, hogy a kibocsátások számottevő csökkentéséig a habzás – a megelőző évekhez hasonlóan – mindennapos jelenség maradhat.

Van-e még tanulság? Sajnálatos módon nem most tapasztaljuk először, hogy országos jelentőségű vízgazdálkodási, ökológiai és környezeti kérdések esetében hiányzik az okos gazda. A természetes vizek habzása távolról sem feltárt jelenség, ezért elemi érdeklődés lett volna időben kutatási programot indítani, nem várva az osztrák fél kezdeményezésére. A kutatások finanszírozása azonban gyakorlatilag megoldatlan, a terepi méréseket is igénylő tudás erodálódik. Ily módon a tervezés gyakran olyan bizonytalan adatokra támaszkodik, amelyek hosszabb távon kellemetlen meglepetésekkel szolgálhatnak. Habozni tehát nem érdemes.

Az irodalom mintegy 150 híres, vízhez kapcsolódó nemzeti és nemzetközi konfliktust tart nyilván. Ha csak az elmúlt néhány évtizedre szorítkozunk, és nem kívánunk Babilonig visszamenni, az események ijesztő gyarapodását figyelhetjük meg. 1950 és 1990 között 43 nagyobb konfliktust regisztráltak. Ez a szám az elmúlt 15 évben 74-re növekedett, miközben a háborús és a tárgyalásos esetek mellett (utóbbira példaként lásd a Rába esetét, ötödik keretes szöveg) új elemként megjelentek a terrorizmus különböző válfajai, beleértve a cyberterrorizmust is.

Az okokról

Eddig a víz nyolc kihívását tekintettük át következményként. De vajon melyek a tágabb értelemben vett kiváltó okok? A népesedést, a városiasodást és az éghajlatváltozást már hangsúlyoztuk. A felsorolást tömören folytatva (Somlyódy and Varis, 2006), a gazdasági fejletlenséget, a szegénységet, az élelmezési biztonság, az oktatás és a kapacitás hiányát, a humánerőforrás-gondokat, a globalizáció és a regionális integráció kiegyensúlyozatlan hatásait, a korrupciót és az intézményi rendszer megannyi gyengeségeit említjük. Regionális és globális hatású eszkalálást elsősorban az jelenthet, hogy az okok és a hatások a fejlődő világ térségeiben halmozottan jelentkeznek, hiszen például a szegénység, az élelmezés és a víz problémái gyakran „kéz a kézben” haladnak. Alapvető globális kihatással bírhat például Kína és India fejlődése is, beleértve az életszínvonal emelkedését, ami mindenütt a vízhasználatok növekedésével párosul. A sokak által már ma is fennállónak tekintett vízválság (Cosgrove and Rijsberman, 2000) kezelése tehát nem elsősorban technikai, hanem alapvetően társadalmi, gazdasági és politikai kérdés, és ennek megfelelő kezelést igényel. Az elemzések szerint a fejlesztési igények – amelyek alapvetően a harmadik világban jelentkeznek – 6000 milliárd dollárra tehető: 30 éves felzárkózást feltételezve, kamatmentesen évi 200 milliárd dollár támogatásra lenne szükség (Cosgrove and Rijsberman, 2000). És az elmondottakból érzékeljük, a megoldás nem elsősorban pénz kérdése.

A tudomány és a technológia szerepe

Ugyan a kihívások kezelésében a tudomány és a technológia ritkán játszik megváltó sze-

repet, a problémák megoldásának megalapozásához a rohamléptékkel gyarapodó eredmények egyre jobban járulnak hozzá. Példa erre a membrántechnológia robbanásszerű fejlődése és a fordított ozmózis alkalmazásával a tengervíz sóatlanításának elterjedése ivóvízellátás céljaira: az elmúlt két évtized során a költségek és az energiaigény mintegy harmadára-negyedére csökkentek (0,6–0,7 €/m³). Ma 100 millió ember nyer ily módon a hagyományossal versenyképes szolgáltatást. Egyre többen gondolják, hogy hosszabb távon a membrán- és más korszerű technológiák felhasználásával, a sóatlanítással, a szennyvizek újrahasznosításával és a hasznos anyagok visszanyerésével megvalósíthatók a zárt víz- és anyagforgalmak (ez háztartási szinten a membrán „csipek” révén a fekete, a szürke és a sárga szennyvizek szétválasztott kezelését jelentené: az egyik végtermék nitrogénműtrágya), integráltan kezelhetők a mennyiségi és minőségi gondok, és a vízhiányról meg a többi vízbajról, mint megoldandó problémáról elfeledkezhetünk. A kulcs persze az, hogy ezeket az elveket és módszereket csak a fejlett világban alkalmazzuk, vagy jut belőlük a fejlődő világ számára is.

A szennyvíztisztításban a reaktortechnika, a bio- és nanotechnológia teszi lehetővé (*hatodik keretes szöveg*), hogy „célzott” baktériumok és vegyszerek specifikus kémiai környezetben, matematikai modellekkel és korszerű üzemirányításra alapozva a korábban ismertnél sokkal hatékonyabban végezzék el feladatukat. Ígéretes nanotechnológiai kutatások folynak az USA-ban speciális szennyezők (TCE, PCB, As, ólom, higany stb.) eltávolítására, igen alacsony koncentrációk elérésére, a fertőtlenítés intenzifikálására, nanomembránok energiafogyasztásának csökkentésére és így tovább.

Intelligens iszaptelek a biológiai szennyvíztisztításban (6)

A hagyományos biológiai szennyvíztisztítás – többnyire nagy betonreaktorokban – olyan környezetet kísér meg létrehozni, ami a szervesanyagok lebontását és átalakítását végző baktériumok elszaporodását eredményezi. A folyamatok jelentős részben spontán módon játszódnak le. A IASON kutatás (Intelligent Activated Sludge Operated by Nanotechnology) célkitűzése intelligens hidrogélek segítségével olyan mikroszkopikus méretű reaktorok létrehozása volt, amelyek segítségével több technológiai folyamat, például a szimultán nitrifikáció és denitrifikáció egyetlen levegőztetett reaktortérben, az aeroblanoxikus funkciók elválasztása nélkül, irányított módon valósítható meg. A betelepítési tesztek során több mint 60 különböző géltípust vizsgáltunk és kidolgoztuk a mikroszkopikus reaktorok (hidrogél felületeken immobilizált szennyvíz mikroorganizmusok biofilm szerkezetben) létrehozásához szükséges feltételeket. Kiválasztottuk a biofilmek kialakításához alkalmas hidrogél-szerkezetet, teszteltük a különböző beoltási eljárásokat, optimalizáltuk a gélfelszín bakteriális betelepítésének stratégiáit, fénymikroszkópos vizsgálatokkal és mikrobiológiai aktivitásmérések segítségével követtük a biofilmek kifejlődését különböző mikroorganizmusokultúrák (autotróf, heterotróf és heterotróf denitrifikáló szervezetek) esetében. A környezeti tényezők függvényében vizsgáltuk a reaktorok szervesanyag és hidraulikai terhelhetőségét és környezetstressz-toleranciáját. A néhány tízcentiméter átmérőjű gélek felületén olyan kettős biofilmet alakítottunk ki, aminek az alsóbb rétegében a diffúzió limitáltsága révén anoxikus zóna alakul ki. Itt a nitrát szolgál elektron akceptorként a denitrifikáló szervezetek számára, miközben a biofilm felső (a külső környezet felé eső) részein aerob körülmények dominálnak, kedvezve ezzel az oxidatív, nitrifikációs folyamatoknak. A biofilmen belüli anoxikus zóna kialakításához a reaktorban lévő

oldott oxigénszint finom szabályozására is szükség volt. A projekt folytatásaként újabb gélekkel mikroszennyező anyagok, gyógyszermaradványok és hormonszármazékok felgyorsított biodegradációját vizsgáljuk majd. (<http://www.vkkt.bme.hu/iason/index.html>). Egy nagy kockázatú kutatás első eredményei.

A mérés technika fejlődése lehetővé teszi a pontosság növelését, a korábban elképzelhetetlennek tartott kis mennyiségek meghatározását, az idő- és térbeli mintavételezés és a monitorozás finomítását a hidrológiában, hidraulikában, a vízkémiában, a limnológiában (*hetedik keretes szöveg*) stb. egyaránt. A távérzékelés és a térinformatikai rendszerek új lehetőségeket nyitnak a „mikroszintű” ismeretek „makroszkopikus” kiterjesztésére tavakra, folyókra, térségekre és vízgyűjtőkre. A hardver és a szoftver fejlődése a számítógépes alkalmazások és az új módszerek sokaságát eredményezi. A globalitás kezelésében fontosak lehetnek az interdiszciplináris, forráskönyveken alapuló elemzések és az ehhez szükséges új módszerek. Együttal ezek a korábbiakénál lényegesen korszerűbb tervezéshez vezethetnek a mérnöki gyakorlatban.

A késleltetett fluoreszcencia és az algapopuláció modellezése (7)

A fotoszintetizáló szervezetek megvilágítás közben és fényről sötétbe helyezés után is fényt bocsátanak ki (fluoreszkálnak), ami felhasználható a növény fotoszintetikus jellemzőinek becslésére. Az ún. „direkt” fluoreszcencia azon fotonok energiájából keletkezik, melyek a növény fényt befogó antennáin elnyelődtek, de a fotoszintézist végző berendezésbe már nem jutottak be. A sötétbe helyezés után mintegy 10–100 másodpercig érzékelhető „késleltetett” fluoreszcencia ugyanakkor a fotoszintézist meghajtó fény leállása után

a fotoszintetikus berendezésben meginduló ellen-
áramlás terméke, amely ugyan sokkal gyengébb
fénykibocsátást eredményez, azonban a késleltet-
ett fluoreszcencia kapcsolata a fotoszintetikus
berendezés jellemzőivel jóval szorosabb, mint a
direkt fluoreszcenciánál, és ezen tulajdonság
miatt könnyen használható az algatársulások
vizsgálatához.

A fluoreszcencia mérése áttörést hozhat a vízben
lebegő algák meghatározásában. A növények
megvilágításából és a kibocsátott fény érzékeléséből
áll, ezért könnyen automatizálható. Segítségével
a hagyományos laboratóriumi eljárásokhoz képest
még a helyszínen is igen nagy gyakorisággal (akár
néhány percenként) vagyunk képesek megmérni
a rendkívül fajgazdag algatársulások összetételét
és összesített mennyiségét. Az automatizált mérési
módszerekkel előállítható adatsorok feltárják a
növényi planktontársulás rendkívül bonyolult
működését és néha zavarbaejtően gyors változásait.
A Balatonon végzett méréseink segítségével más
módokon nem regisztrálható jelenségeket figyel-
tünk meg az algatársulásban és a környezetben
is (Istvánovics és mtsi., 2005). A késleltetett fluoresz-
cenciás mérések bebizonyították, hogy az algavi-
rágzások a körülmények kedvező együttállása
esetén rendkívüli gyorsasággal épülnek fel, majd
a kedvezőtlen hatások, illetve a tápanyagkészlet
kimerülése miatt hasonló sebességgel omlanak
össze. A nagy időbeli sűrűségű adatsorokból az is
kiderült, hogy a szokványos vízminőségi mérési
gyakorlat (kétheti/havi) messze nem elegendő
ahhoz, hogy a néhány napos generációs idővel
rendelkező algák társulását nyomon tudjuk kö-
vetni. Ez a következtetés befolyásolja a vízminő-
ség alakulását számoló modelleket is, amelyek-
ben eddig feltételezték, hogy a mérések jól repre-
zentálják a valóságban lezajló folyamatokat. A
modelleket szintén fel kell készíteni a korábban
sejtettnél jóval hevesebb és helyenként kiszámítha-
tatlannak tűnő változásokra. A megközelíthető
minősíthető biomasszacácsok leírására újfajta
„küszöbmodell” fejlesztettünk ki, mely képes az
apró környezeti változások nyomán bekövetkező
nagy mértékű algaszaporulat, illetve pusztulás

szimulációjára (Honti és mtsi., 2007). A küszöb-
modell segítségével sikeresen modelleztük a Bala-
ton fokozatos eutrofizálódását a hetvenes évektől
kezdvé, majd a vízminőség késleltetetten bekö-
vetkező javulását a foszforterhelés csökkentésének
eredményeként. Hittük volna egy évtizede?

Zárszó

Beszélhetünk vízválságról vagy sem? A válasz
szubjektív megítélésünktől függően sokféle
lehet. Néhány dolog azonban bizonyos. A
nyolc „csapással” felvázolt helyzetkép és a
trendek elemzése alapján optimisták aligha
lehetünk. A kiváltó okok egyre jobban kívül
esnek a vízgazdálkodás területéről: alapvető-
en társadalmi, gazdasági és politikai eredetű-
ek, és ennek megfelelő kezelést igényelnek.
Különösen súlyos a helyzet a fejlődő világban,
ahol a sokrétű vízproblémák a szegénységgel,
az élelmezési bajokkal, a demográfiai változá-
sokkal, a kapacitásihiánnyal, a korrupcióval
és a kormányzás gyengeségeivel együtt halmo-
zottan jelentkeznek. A jövő bizonytalan és
kérdések sokaságával találkozunk. Melyek
lesznek például az éghajlatváltozás és a globa-
lizáció hatásai? Vagy mi lesz a következménye
Kína, India és a kapcsolódó térség fejlődésé-
nek? Látszólag a fejlett világban minden
rendben van. De tényleg így van ez? Hiba
lenne tévhitekben ringatni magunkat: a Föld
túl picinnyé kezd válni ahhoz, hogy a „meg-
úszás” reményében kívül maradjunk. Csele-
kedni kell, és ebben a fejlett világnak – beleért-
ve saját magunkat is – vezető szerepet kell
vállalnia. Az idő szorít.

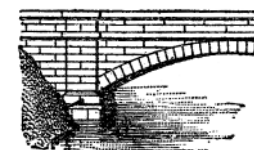
Kulcsszavak: globális kihívás, vízhiány, városi-
asodás, ivóvíz és szennyvíz, szennyezések, szélső-
ségek, éghajlatváltozás, nemzetközi vizek, tuda-
mány és technológia, Balaton, Rába, Tisza

IRODALOM

- BME VKKT (2003): Tudományos alapok az árvízvé-
delem és a megelőzés fejlesztéséhez a Tisza vízgyűj-
tőjén. A Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése. Kutatási
jelentés (kézirat). Budapest
Cosgrove, J. W. and Rijsberman, F. (2000) World
Water Vision: Making Water Everybody's Business,
World Water Council, Earthscan Publications Ltd.
Fleit, E., Somlyódy, L., Pöcze K. and Melicz Z. (2007)
Intelligent Activated Sludge Operated by Nanotech-
nology - IASON. Presentation at 2007 IWA Leading
Edge Technologies Conference, Singapore
Honti M., V. Istvánovics and A. Osztóics (2007).
Stability and change of phytoplankton communi-
ties in a highly dynamic environment – the case of
large, shallow Lake Balaton (Hungary). *Hydrobio-
logia* 581
Istvánovics V., Honti M., Osztóics A., H. M. Shafik,
Padisák J., Y. Yacobi and W. Eckert (2005) On-line
delayed fluorescence excitation spectroscopy, as a
tool for continuous monitoring of phytoplankton
dynamics and its application in shallow Lake Bala-
ton (Hungary). *Freshwater Biology* 50
Kulsreshtha, S. (1993) World Water Resources and
Regional Vulnerability: Impact on Future Changes.
Research Report RR-93-10, IIASA, Laxenburg,
Austria
Shiklomanov, I. A. 1999. World Water Resources:
Modern Assessment and Outlook for the 21st Cen-

tury. Prepared in the framework of IHP UNESCO,
St. Peterburg. State Hydrological Institute, Federal
Service of Russia for Hydrometeorology and Envi-
ronment Monitoring

- Somlyódy, L. (1995): Water Quality Management: Can
We Improve Integration to Face Future Problems?
Water Science and Technology, Vol. 31., No. 8
Somlyódy, L. szerk. (2002): A hazai vízgazdálkodás
stratégiai kérdései. Magyar Tudományos Akadémia,
Budapest
Somlyódy, L. (2005) A Balaton vízpótlás szükségessége:
tenni vagy nem tenni? Vízügyi Közlemények (kü-
lönszám)
Somlyódy, L. and Honti, M. (2005): Water transfer to
Lake Balaton: to act or not to act? Water Science
and Technology, Vol. 52. No. 6.
Somlyódy, L. and Varis, O. (2006) Freshwater under
pressure. International Review for Environmental
Strategies, Vol. 6, No.2
Varis, O. and Somlyódy, L. (1997) Global Urbaniza-
tion and Urban Water: Can Sustainability Be Affor-
dable? Water Science and Technology, Vol. 35,
No.2
WHO (2004) Inheriting the World: The Atlas of
Children's Health and the Environment. Geneva
WHO and UNICEF (2004) Meeting the MDG
Drinking Water and Sanitation Target. A Mid-Term
Assessment of Progress. WHO/UNICEF. New
York



EMBERI KÉPZELETÜNK PRÓBÁJA: ATOMI ÜTKÖZÉSEK NYOMÁBAN

Pálincás József

akadémikus, egyetemi tanár
Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

„Tetszik a relativitás- és a kvantumelmélet,
mert számomra oly érthetetlenek.
Bennük nyughatatlanul
és megfoghatatlanul
riadt hatyúként bujkál a tér;
az atom pedig úri kedve szerint
folyton átírja a szabályokat.”
(D. H. Lawrence)

„Előfordult már Önnek, hogy látta az atomot?”
– kérdezte egy hölgy újra és újra Leon Lederman
egyik ismeretterjesztő előadásán, mire
Lederman visszakérdezett: – Asszonyom,
látta ön valaha a római pápát?

– Hát persze – jött a szokásos válasz. – Többször is láttam Őszentségét a televízióban.

– Igazán? Nem azt látta, ahogy a képcső elektronnyalábja végigpásztazza a fluoreszcens ernyőt, fénylő képpontokat villantva fel gyors egymásutánban? De Önnek jó oka volt feltételezni, hogy amit látott, az összefüggésben volt a római pápával. Úgyhogy higgye el nekem, hogy az atomok „képe” pont olyan valóságos, mint az Ön által látott pápáé. (L. Lederman and D. Teresi, 1993)

Az atomi és szubatomi fizika művelői számára, akik együtt élnek az atomok létezésének bizonyosságával, igen elgondolkodtató lehet az előbbi párbeszéd, hiszen egyrészt arra

emlékeztet, hogy hogyan is szerzünk tudomást arról, ami az atomok belsejében „történik”, másrészt rávilágít képzeletünk erejére, azaz a képzelőerő fontosságára. Amit biztosan tudunk az atomokról és részeikről, az egy csomó barátságtalan matematikai formula vagy bonyolult berendezés által szolgáltatott jel, amelyeket megpróbálunk „lefordítani” szemléletes képpé. Nem Lederman „makacs hölgye” az egyetlen, aki felfoghatatlannak érzi, hogy „komoly tudósok lelkesen és csapatmunkával láthatatlan kis objektumokat hajkurászunk”.

Alapvető emberi megnyilvánulás, ahogyan a világra a *Milyen szép!* érzésével rászédálkozunk. Eme rácsodálkozásnak van egy másik alapvető – noha kissé más nézőpontú – kérdése is, amely a kíváncsiságé, és úgyszintén egyidős az emberrel: *Miből és hogyan épül fel a világ?* Mik az alkotóelemei, mi tartja össze ezeket az alkotóelemeket?

Démokritosz érdeme az a természetismeret máig meghatározó *filozófiai* felismerés, hogy a világ tovább már nem osztható alkotóelemekből, *atomokból* épül fel. Mondhatjuk, hogy az atom több mint kétezer év után közgondolkodásunk részévé vált. Ma a természetben ismert elemek (hidrogén, szén, vas vagy éppen az arany) köznapi tulajdonságait meg-

határozó építőelemeket nevezzük atomoknak, noha jól tudjuk, hogy ezek meglehetősen bonyolult szerkezettel rendelkező építőelemek, azaz tovább oszthatók.

Új kép alakult ki az atomokról a tizenkilencedig század utolsó éveiben és a huszadik század első két évtizedében. A korábban megbecsült méretű és a hétköznapi gondolkodás számára felfoghatatlanul kicsinek (10^{-10} m) talált atomról kiderült, hogy „szerkezete van”. Ezen szerkezet első – közgondolkodásunkat máig meghatározó – modellje valójában Kopernikus Naprendszer-modelljének *atomi képe*: Egy az atom méretéhez képest nagyon kicsi, de az atom tömegének nagy részét kitevő tömegű középpont, az atommag körül „keringenek” a kis tömegű és kiterjedés nélkülinek tűnő elektronok.

A Naprendszerrel való párhuzam azonban „fizikus szemmel” nagyon felületes. Az elektronok és az atommag közötti vonzást nem a jól ismert gravitáció, hanem az elektromos erő okozza. S ez a kisebbik különbség. A nagyon kis térrészbe „bezárt” elektronok mozgását a mi megszokott világunkétól alapvetően eltérő mozgástörvények irányítják. Képzeletünk próbája, hogy a mozgás szó hallatán a fejünkben megjelenő képnek van-e értelme az atomi elektronok esetében. Azt ugyanis nem tudjuk megmondani, hogy az elektron az atomban hol van. Tudjuk, hogy ott van, sőt azt is nagyon pontosan tudjuk, hogy „jelenléte” milyen módon oszlik el, milyen mintázatot követ. Már az is csoda, hogy ezeket a képileg nehezen megjeleníthető törvényeket az ember képes – nagyrészt a matematika segítségével – valamennyire megérteni, *elképzelni*. Ezért is mondhatjuk, hogy a kis térrészbe bezárt részecskék mozgását leíró kvantummechanika az emberiség egyik legnagyobb intellektuális alkotása.

Az „atomtörténet” következő jelentős állomása, amikor a huszadik század harmincas éveiben kiderült, hogy az atomok méreténél több mint tízezerszer kisebb méretű atommagoknak is van szerkezetük: protonokból és neutronokból épülnek fel. A huszadik század második felében azután a protonok és neutronok is elvesztették „elemi” jelzőjüket, s így jogukat a görög „*a tom*” – tovább már nem osztható – megjelöléshez. Ezek építőelemei a *kvarkok*, mai tudásunk szerint a világ tovább már nem osztható részecskéi, igazi „atomjai”. A mai részecske- (vagy elemirész) fizika „atomjai” az *elektron* és öt testvére, s a jobb név híján *u(p)* „fel” és *d(own)* „le” kvarkok és az ő négy testvérük.

A pozitív töltésű protont két *u* és egy *d* kvark építi fel, az elektromos töltés nélküli neutron pedig két *d* és egy *u* kvarkból áll, mindezek együtt alkotják a különböző elemek atommagjait. Tisztelt olvasók, próbálják meg *elképzelni* ezeket a kiterjedés nélküli elemi részecskéket, amelyek többsége ugyanakkor tömeggel, elektromos töltéssel, sőt egy olyan tulajdonsággal is rendelkezik, ami pontosan megfelel egy, a tengelye körül gyorsan forgó (kiterjedéssel rendelkező!) test perdületének, s ráadásként ez a perdület csak „fel” (jobbra forog valami) és „le” (balra forog valami) irányú és meghatározott nagyságú lehet.

Ezek az elemi részecskék meglehetősen próbára teszik képzeletünket, ugyanakkor a köznapi életben alig találunk olyan jelenséget, amely nem közvetlenül atomi folyamatokra, az atomok tulajdonságaira vezethető vissza. Az égés, a konyhasó oldódása a vízben, a víz felmelegedése a mikrohullámú sütőben, a nappali égbolt kéksége mind az atomok tulajdonságain alapulnak. Testünk is atomokból épül fel, a kémiai, biokémiai, élettani folyamatok mind az atomok különleges tulajdon-

ságainak következményei. Az iskolában tanult „erők”, mint például a sűrűségi erő, két anyagdarab felületén érintkező atomok kölcsönhatásainak eredményei. A rugalmas erő eredete az atomok speciális összekapcsolódásában keresendő. A molekulákat és a szilárd testeket az atomok között fellépő, az elektromágneses kölcsönhatásra visszavezethető erő tartja egyben.

Mára az atomok tulajdonságainak olyan részleteit ismerjük, amelyek a huszadik század „paradigmaváltásának” idején még vagy fel sem merültek, vagy elérhetetlennek tűntek mind a kísérlet mind az elmélet számára.

Hogyan képzeljük el az atomot, amelyről azt állítom, hogy nagyon sok tulajdonságát ismerjük, sőt bonyolult molekulákká, szilárd anyaggá való összekapcsolódásukat nagy pontossággal le tudjuk írni?

Az atom saját méretéhez képest kisméretű magját képzeljük egy borsószem méretű, elektromos töltéssel rendelkező tömör gömbnek. Ekkor a hidrogénatom egyetlen elektronja egy közepes sportaréna méretű, gömb alakú térfogatban található, leginkább annak a külső egyharmad sugárnyi vastagságú részét jelentő gömbhéjban. Vagy képzeljük egy jó vastag héjú narancs héját olyannak, hogy a héjnak nincs éles határa, hanem kifelé és befelé egyre ritkább lesz. A héj sűrűsége (vagy ritkasága) mondja meg nekünk, hogy az elektron „mennyire van ott” az adott helyen. Ekkor persze az atom magja már a milliméter ezred részénél kisebb méretű, amit ugyancsak nehéz magunk elé *képzelni*. Az elektron tömege a hidrogén atommag (proton) tömegének kétezred része, a mérete pedig – az atomi méreteket tekintve is – nagyon kicsi, ha van egyáltalán „mérete”, elektromos töltése pedig *pontosan* megegyezik a proton töltésével. A hidrogénatom elektronja a fentebb emleget-

tett egyharmad atomsugárnyi vastagságú, pontos kontúrok nélküli gömbhéjban minden irányban egyenletesen van jelen. Azaz a hidrogénatom elektronjára nem tekinthetünk úgy, mint egy Nap körül keringő bolygóra. Nincs ugyanis „a mozgásából származó” perdülete, sőt igazából pályája sincs.

A szén atom szerkezetét kutatva kiderült, hogy annak hat elektronjából négy két egymásban lévő gömbhéjban található gömbszimmetrikus eloszlásban. Az ötödik és hatodik elektronja esetén azonban egy új „mintázat” jelenik meg: az elektron egy újabb gömbhéjban, de csak a gömbhéj süvegében vagy a süvegek nélküli gömbhéjgyűrűben van jelen. Bonyolultabb atomok esetén ezek a mintázatok is jóval bonyolultabbak. Az úgynevezett nemesgázoknál – például a neon – a sok elektron eloszlásának bonyolult mintázatai gömbszimmetrikusra egészítik ki egymást, s ebből ered ezen „nemes”-nek nevezett atomok vegyülési képtelensége. Az elektronok egyes mintázatokhoz tartozó állapotainak energiája pontosan meghatározott érték.

Tapasztaltuk és tanultuk, hogy a szén szilárd anyag, sőt bizonyos módosulata, a gyémánt a legkeményebb anyagok egyike. Ugyanakkor azt is tudjuk, hogy a szénatomok térfogatának nagy része üres, kevesebb, mint egymilliárdod részét tölti ki az atommag, az elektronok pedig sokat „nyüzsgögnék” ugyan az atomban, de annak sűrűségéhez alig járulnak hozzá. Miért kemény akkor a gyémánt, miért áthatolhatatlanok a szilárd anyagok? Áthatolhatatlanok? Egy másik anyagdarab, sőt egy másik atom számára áthatolhatatlanok, de egy elektron vagy egy proton számára nagyon is átjárhatóak. Egy fémlemez köznap értelemben vett áthatolhatatlanságát, keménységét az atomjainak szűk terébe bezárt elektronok különös „nyüzgése” okozza.

Egy gyors proton azonban „nevetve” halad át egy fémlemenzen!

Ezen a ponton már az atomi ütközések nyomába eredhetünk, amely fő kutatási területem. Velem is előfordult már, hogy „látam egy atomot”. A Ledermannak feltett kérdésre ma azt válaszolhatnám, hogy egy úgynevezett atomerő-mikroszkóp segítségével (Atomic Force Microscope, AFM) lényegében látjuk a szilíciumlapocska felületén elhelyezkedő nehezebb atomokat. Ám arra a kérdésre, hogy látjuk-e az atomi ütközéseket, vagy látjuk-e egy atom belsejét, ma is hasonló választ tudunk adni, mint amelyet Ledermann adott a makacsul hitetlenkedő hölgynek. Felgyorsított elektronokat vagy protonokat küldünk az atomok közelébe vagy belsejébe, és a kijövő vagy éppen az onnan kiszakított elektronokat, esetleg a visszamaradó elektronhiányos atom (szokásos nevén ion) sugárzását megfigyelve, „jó okunk van azt hinni”, hogy tudjuk, hogy mi történik az atom belsejében. Ezzel össze is foglaltam az atomi ütközések fizikájának lényegét.

S hogy miért kutatjuk mindezt? Az atomok és molekulák elektronsűrűségeinek pontos kiszámítása, és az eredmények gondos ellenőrzése bizonyára elvezet majd egy könnyebben magunk elé képzelhető atom képéhez.

Az atomi ütközések kutatása során feltárt eredmények nagymértékben hozzájárulnak életminőségünk javításához. A sugárterápia alapvető kérdéseire például az atomi ütközések kutatási eredményei segítségével válaszolhatunk. A daganatos betegségek felgyorsított részecskékkel való kezelése során csak annak ismeretében tudjuk pontosan megtervezni, hogy egy felgyorsított részecske milyen módon hat az élő anyagban, ha tudjuk, hogyan hat az egyes atomokra. Milyen atommagot

vagy iont és milyen sebességre felgyorsítva kell használnunk, ha optimális hatást akarunk elérni a kóros sejtek elpusztításában? S még hosszan sorolhatnánk a sugárbiológia kérdéseit, amelyek az atomi ütközések fizikájának ismeretében válaszolhatók meg.

Kutatási területem „társadalmi hasznosságának” egy másik közismert példája, hogy az emberiség egyre súlyosbodó energiaellátásának és az energielőállítás során felmerülő környezeti problémák megoldásának egyik lehetséges módja, hogy a Nap energiatermelési folyamatait földi körülmények közé szelídítsük, azaz kontrollált atommagfúzió alapuló energia-termelő reaktort alkossunk. Az atommagfúzió létrehozásához egy különleges anyagot, atommagok, ionok, elektronok forró keverékét, az anyag negyedik halmazállapotának is nevezett *plazmát* kell létrehozni nagyon speciális feltételekkel. Ezt a plazmát atomi ütközések hozzák létre és tartják fenn. Ennek tervezéséhez az atomi ütközések tulajdonságainak ismerete éppen olyan alapvető technikai adat, mint a beton szilárdságáé egy híd megtervezéséhez.

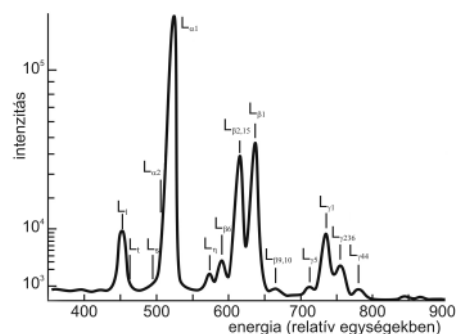
Az ionizált atom elektronfelhőjének aszimmetriája

Amikor egy nagyenergiájú elektron vagy proton összeütközik egy atommal, az ütközés az atom elektronjainak „pedáns elrendeződését” megváltoztatja. Sőt az ütközés el is távolíthatja az atom egy vagy néhány elektronját. Ezt a folyamatot nevezzük *ionizációnak*. Hogyan észlelhető az ionizáció? Például az atomból kilépő elektronok megfigyelésével, amelyek az atomból kiszabadulva már a mi világunkban megszokott, „normális” módon viselkednek: pályájuk követhető, egy fluoreszcens ernyőn (vagy egy sokkal bonyolultabb érzékelőn, detektoron) egy felvillanást (vagy

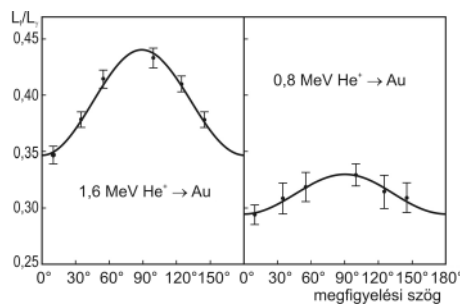
egy elektromos jelet) létrehozva jelzik, hogy hol vannak. Modern detektorainkkal energiájukat, mozgásirányukat is meghatározhatjuk.

Egy másik, közvetett módszerrel is megfigyelhető az ionizáció: a megbolygatott atomi elektronelrendeződés igyekszik felvenni a legkisebb energiájú, úgynevezett alapállapotát. Eközben vagy elektromágneses sugárzást (közönséges fényt, röntgensugárzást), vagy egy további elektront bocsát ki. Az előbbinek egy példája az 1. ábrán látható. Aranyatomokat protonokkal ütköztetve, és megmérve a kibocsátott röntgensugarak energia szerinti eloszlását, az 1. ábrán látható képet kapjuk. Az egyes csúcsok (szokásos elnevezéssel vonalak) az ionizált arany atom elektroneloszlása különböző átrendeződéseinek felelnek meg.

Az eloszlás jól mutatja ezen egyszerű atomi folyamat részletgazdagságát. Ragadjunk ki a rengeteg részletből egyet és tegyünk fel egy „kutatói kérdést”: Tükröződik-e az egyes elektronállapotok (mintázatok) térbeli aszimmetriája az ütközésben létrehozott ionok sugárzásában? A 2. ábrán látható, hogy van a röntgensugárzásnak olyan része, amely különböző irányokban különböző intenzitású. A sugárzás térbeli eloszlását leírhatjuk egy nem

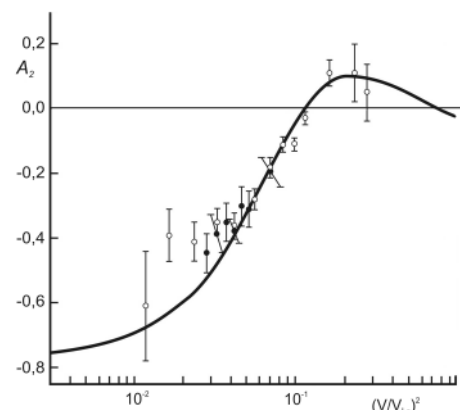


1. ábra • Gyors protonokkal a második (L) elektronhéján ionizált aranyatomok röntgensugárzásának energia szerinti eloszlása.

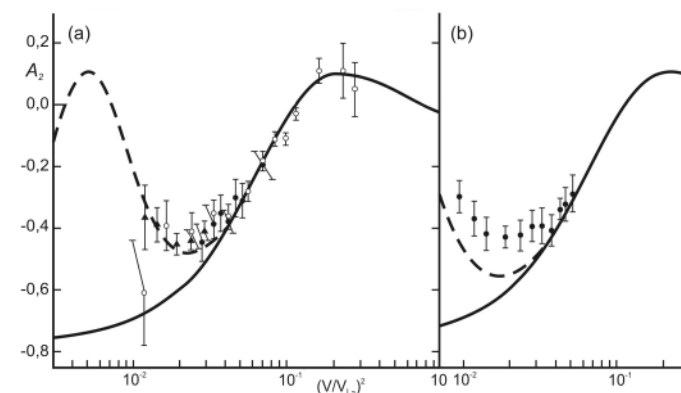


2. ábra • Az elektronállapotok (mintázatok) térbeli aszimmetriájának megjelenése az ütközésben létrehozott ionok sugárzásában.

túl bonyolult formulával, amelyben egy mennyiséggel (nevezük aszimmetria-paraméternek) jellemezhető, hogy az eloszlás milyen mértékben tér el a minden irányban egyenletestől. Egyik korai vizsgálatunkban arra jutottunk, hogy ennek a paraméternek a protonok energiájától való függését az elmélet nem írja le pontosan. Kísérletünk elmentmondásban volt korábbi vizsgálatokkal (W. Jitschin és mts, 1979), amelyek egyezni látszottak egy elfogadott elméleti leírással,



3. ábra • Az L elektronállapotok aszimmetria-paraméternek függése a gyors protonok sebességétől. A folytonos vonal egy elméleti modell eredménye.



4. ábra • Az L elektronállapotok aszimmetria-paraméternek függése a gyors protonok és alfa részecskék sebességétől. A folytonos vonal a korábbi elméleti modell eredménye, a szaggatott vonal a részecskék eltérülését figyelembe vevő modellünk eredménye.

ahogyan azt a 3. ábra mutatja. Az ábrán kis sötét körök jelzik a mi eredményeinket. Pontosabb kísérletekkel és alfa részecskékkel (hélium atommagok) is elvégzett mérésekkel kimutattuk, hogy az elmélettől való eltérés valóban jelentős (J. Pálincás és mts, 1980). Sőt, megtaláltuk az eltérés okát is, amelyet egyszerűen és szemléletesen úgy lehet összefoglalni, hogy az atom elektronjait ionizáló proton vagy alfa részecske az atom magjának terében hiperbolapályán halad, amely irányváltást éppen az atomi elektronok különös térbeli eloszlása miatt kell figyelembe venni. Ezek a kísérleti eredmények és a kétféle elméleti számítás a 4. ábrán látható. Az ábrán kis sötét körök és háromszögek jelölik saját kísérleti eredményeinket, és szaggatott vonal a saját modellünk alapján végzett számítások eredményét. Eredményeinket később más kutatócsoportok is megerősítették, mi is végeztünk további vizsgálatokat sokféle gyors nehézionnal (J. Pálincás és mts, 1983). A kísérleti eredmények általában jól egyeztek elméleti számításaink eredményeivel.

Ennek a kísérletnek sem a technikája sem az elméleti leírása nem tartozott a legbonyo-

lultabb feladatok közé. Számomra mégis fontos „kutatói tanulsággal” bír: a precíz kísérleti eredmények még az egyszerűnek tűnő problémák esetén is hozhatnak váratlan eredményt, amelyek igazi továbblépési lehetőséget jelentenek a már elfogadottnak tekintett elméleti leírás pontosításában.

Két egzotikus elektronbefogás

Az atomi elektronok elrendeződését sokféleképpen megzavarhatja az atommal ütköző gyors proton vagy ion. A fentebb már említett ionizáció során a gyors ion magával is ragadhatja (befoghatja) az atom egy vagy több elektronját, méghozzá többféleképpen. Az egyik lehetőség, hogy az atom egyik kötött elektronját (a bevezetésben leírt héjszerű elrendezésében lévők közül az egyiket) úgy ragadja magával, hogy azt egyik saját kötött állapotában (saját elektronhéjában) viszi magával. Ezt nevezhetjük kötött állapoti elektronbefogásnak. Egy másik esetben a gyors ion úgy ragad magával egy elektront, hogy azt nem valamelyik kötött állapotába (a gyors ion saját lehetséges elektron-mintázataiba) fogja be, hanem magával sodorja. Ilyenkor azt mondjuk, hogy

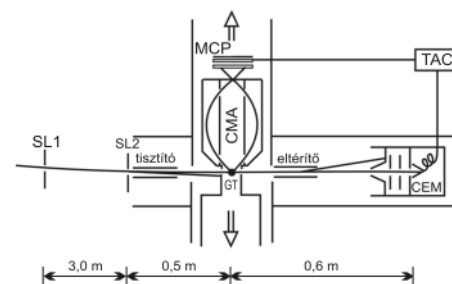
az elektron a gyors ion egyik ionizált állapotába kerül. Ezt a folyamatot folytonos állapotokba történő befogásnak nevezzük, és szemléletesen úgy képzelhetjük el, hogy az elektron, amely eredetileg az atom valamelyik héján tartózkodott, az ütközés után „együtt utazik” a gyors ionnal. Látni fogjuk, hogy a fenti folyamatok kombinációja is előfordulhat, amelyet transzferionizációnak nevezünk majd.

Hogyan képzelhetjük el az elektronbefogást? Az elméleti leírást, a technikailag meglehetősen bonyolult kvantummechanikai számításokat is csak akkor tudjuk elvégezni, ha van valamilyen elképzelésünk az elektronbefogás folyamatának végbemeneteléről. Többféle mechanizmus is lehetséges. Az egyikben – egyszerűen fogalmazva – csak a befogott elektron játszik lényeges szerepet. Az atomi elektront a bevezetésben említett „nyüzgése” miatt úgy képzelhetjük el, hogy az atom belsejében gyorsan mozog. Nem egy meghatározott sebességgel vagy „pályán”, hanem sebessége is „eloszlik”, azaz bizonyos valószínűséggel elvesz különböző értékeket. Minél kisebb helyre van bezárva az elektron (azaz minél erősebben az atomhoz van kötve), a felvett sebességek értékei annál nagyobb tartományban lehetségesek. (A Heisenberg-féle bizonytalansági reláció egyik megjelenése!) Az atomi elektronnak lehetséges például, hogy pontosan olyan a sebessége is, mint a gyors ioné. Ekkor az elektron az egymás közelébe kerülő atom és a gyors ion közül inkább a gyors ionhoz tartozónak tekinthető (annak kvantummechanikai valószínűsége, hogy a gyors ionhoz tartozik nagyobb, mint annak, hogy az eredeti atomhoz), és nem valamilyen pontosan leírható mozgás következtében, de „átkerül” a gyorsan mozgó ionra. Könnyű belátni, hogy ez csak akkor következhet be, ha az ion sebessége nem sokkal nagyobb, mint az atomi

elektron sebességeloszlásában viszonylag nagy valószínűségekkel előforduló sebességek.

Thomas 1927-ben vetette fel annak a lehetőségét (L. H. Thomas, 1927), hogy amikor egy többelektronos atom, például a hélium, nagyon nagy sebességű ionnal, például egy protonnal ütközik, az elektronbefogásnak egy másik – talán a fenténél szemléletesebb – módja is megvalósulhat, amelyben a hélium mindkét elektronja részt vesz. Az ütközés úgy zajlik le, hogy a gyors proton ütközik a hélium egyik elektronjával, amely az ütközés következtében éppen akkora sebességre tesz szert, hogy amikor ez az elektron ütközik ugyanezen atom másik elektronjával, akkor az első elektron a gyors protonnal azonos sebességre tesz szert, a másik pedig a gyors proton irányára éppen merőlegesen adott sebességgel repül ki azt atomból, amely így mindkét elektronját elveszíti. Ezt a szórási folyamatot Thomas-szórásnak nevezzük, és kimutatása meglehetősen nehéz feladat elé állította a kísérleti fizikusokat. Valójában egy tűt kell keresni a szalmakazalban: Azt kell megfigyelni, hogy a héliummal ütköző gyors proton befog egy elektront (semleges hidrogénatomná válik) és ezzel egyidejűleg a közben hidrogénatomná vált gyors proton haladási irányára merőlegesen egy meghatározott energián megjelenik egy elektron.

A kísérleti berendezés, amellyel sikerült a folyamatot meggyőzően kimutatni, legfontosabb elemei az 5. ábrán láthatók. Egy, a megfigyelni kívánt energiájú elektronokat átengedő speciális elektron-spektrométerrel (CMA) az elektronok szög szerinti eloszlását mértük gyors (egymillió volt feszültséggel felgyorsított) protonok és héliumatomok ütközésében. Egy másik detektorral (CEM) pedig az ütközésből származó gyors hidrogénatomokat regisztráltuk. A berendezés „lelke” egy



5. ábra • A Thomas-szórás kimutatására szolgáló kísérleti berendezés vázlatos bemutatása

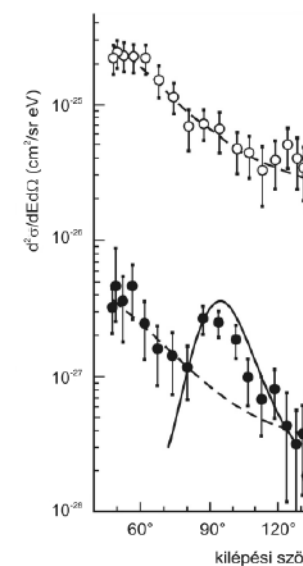
elektronikai egység (TAC), amely az elektronok és a hidrogénatomok egyidejű beérkezését (koincidenciáját) regisztrálja. Ennek időfeloldását – azt a pontosságot, amellyel az egyidejűséget mérni tudjuk – kellően megjavítva ezt a sokáig kimutathatatlan „egzotikus” elektronbefogást 1989-ben – majd egyéves kísérleti munkával – kimutattuk (J. Pálincás és mts, 1989).

A kísérlet eredménye a 6. ábrán látható, ahol a héliumatomból egy elektront befogott protonokkal egyidejűleg kilépő, a Thomas-szórás kinematikai feltételeit teljesítő energiájú (1 MeV-os protonok esetén 600 eV-os) elektronok irány szerinti eloszlása látható sötét körökkel jelölve. Az ábrán – a kísérlet ellenpróbája – az elektronok eloszlása Ne atomok esetén is látható, világos körökkel jelölve. Ez utóbbi esetben – ahogyan az várható – a Thomas-szórás hatása elhanyagolható.

Amint fentebb említettem, az elektronbefogásnak lehetséges egy olyan speciális esete is, amikor az atom elektronját a gyors ion „magával sodorja”, kissé pontosabban nem kötött állapotába fogja be. Ezt a jelenséget az angol *electron capture to the continuum* rövidítéseként ECC-nek nevezzük az atomfizikai szlengben. Ezek a gyors ionnal együtt utazó elektronok a kísérletben úgy jelennek

meg, hogy az ütközésből kilépő elektronok kinetikus energiájának (sebességének) eloszlásában az ütközésből kilépő gyors ionok irányában egy nagyon éles csúcs („cusp”) jelenik meg a gyors ionok sebességének megfelelő elektronsebességnél. Ha a gyors ion maga is rendelkezik elektronnal, ilyen például a héliumion, amelynek van egy elektronja, akkor az ion az ütközésben ezt az elektronját el is veszítheti. Ezt a folyamatot az angol *electron loss to the continuum* rövidítéseként ELC-nek nevezzük. Ezek az elektronok az ütközésből kilépő elektronok eloszlásában pontosan úgy jelennek meg, mint folytonos állapotba befogott (ECC) elektronok.

A két folyamat kísérleti elkülönítése technikailag hasonlóan történhet, mint az előző esetben: megmérjük a gyors ionok irányába



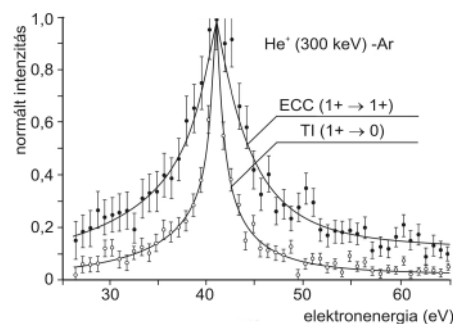
6. ábra • A Thomas-szórás kinematikai feltételeit teljesítő, 600 eV-os elektronok irány szerinti eloszlása 1 MeV energiájú protonoknak hélium- és neonatomokkal való ütközése esetén. A héliumatomok esetén látható csúcs jelzi a Thomas-szórás létrejöttét.

kilépő azon elektronok energia szerinti eloszlását, amelyek egyidejűleg lépnek ki az elektronjukat el nem veszített héliumionokkal (egyszeresen ionizált héliumionok) és azokat, amelyek egyidejűleg lépnek ki az elektronját elvesztett héliumionokkal (kétszeresen ionizált héliumionok). Ezek arányát kívántuk megmérni egy kísérletben, amikor azt tapasztaltuk, hogy ha egyszeresen ionizált héliumionok argonatomokkal ütköznek, akkor az ütközésből kilépő ionizálatlan hélium, amely tehát egy elektront már befogott valamelyik kötött állapotába, szintén „magával sodor” elektronokat! E meglepő kísérleti eredmény a 7. ábrán látható TI megjelöléssel, amely a transzferionizáció elnevezésére utal.

A kísérlet alapján úgy tűnt, hogy egy gyors (semleges) héliumatom is képes elektronokat befogni. A kísérletet tisztább körülmények között elvégezve, azaz héliumatom-nyalábot előállítva, ezt a feltételezést sikerült is bizonyítani (L. Sarkadi és mts, 1989). Az eredmények a 8. ábrán láthatók. Az eredmények egyszerű szemléletes magyarázata, hogy a héliumatomhoz kapcsolódó elektron a hélium másik két elektronjával egy rövid ideig fennmaradó különleges elektronelrendeződést (rezonanciát), hoz létre. Később a folyamat számos további részletét sikerült felderítenünk (P. A. Závodszky és mts, 1994).

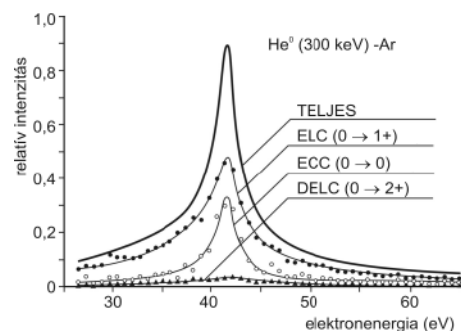
A plazma állapotáról árulkodó röntgensugárzás

A bevezetésben már röviden érintettem az anyag egy különleges állapotát, az elektronok, ionok, atommagok forró keveréke alkotta plazmát. Egy ilyen „anyagban” még a legegyszerűbb méréseket is csak az onnan kilépő sugárzás segítségével lehet elvégezni. A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetében megépített úgynevezett



7. ábra • 300 keV energiájú héliumionok és argonatomok ütközése esetén részecskenyaláb irányába a héliumionokkal (ECC) és a héliumatomokkal (TI) egyidejűleg kilépő elektronok energia szerinti eloszlása.

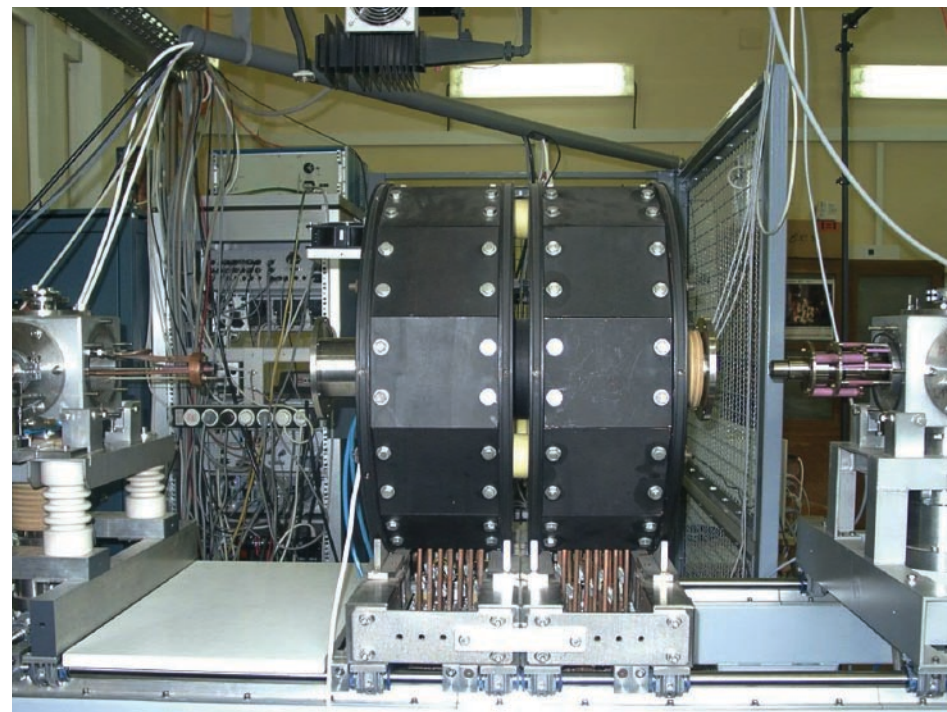
elektron-ciklotron rezonancián alapuló (az angol *Electron Cyclotron Resonance* rövidítéseként ECR-nak nevezett) ionforrás belsejében ilyen különleges anyagot állítunk elő (S. Biri és mts, 1997). Részben azért, hogy az elektronjai egy résztől megfosztott ionokat az ionforrásból kivezelve azokkal kísérleteket végezzünk, részben azért, hogy az anyag e különleges állapotát vizsgálhassuk.



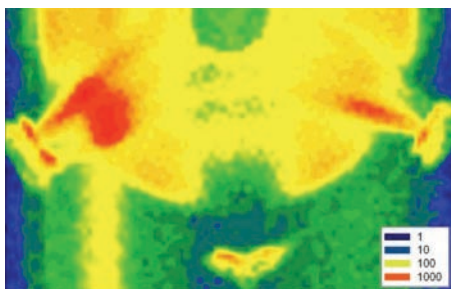
8. ábra • 300 keV energiájú héliumatomok és argonatomok ütközése esetén részecskenyaláb irányába a héliumatomokkal (ECC), a héliumionokkal (ELC) és a kétszeresen ionizált héliumionokkal egyidejűleg kilépő elektronok energia szerinti eloszlása.

Az ECR ionforrás fényképe a 9. ábrán látható. Működését legegyszerűbb úgy elképzelni, mint egy nagyon nagyteljesítményű mikrohullámú sütőt, amelyben az anyagot (az atomokat) annyira felmelegítjük, hogy megszűnik közönséges formájú anyag lenni, plazmává alakul, amelyet egy trükkösen felépített mágneses térrel tartunk a berendezés belsejében. Másképp nem is lehet, mert a plazma közönséges anyaggal érintkezve vagy lehűl (ha kevés plazmáról van szó), vagy az anyagot kísérli meg plazmává alakítani, magyarul átégeti a tárolóedény falát. A mikrohullámú sütő hasonlat annyiban is helytálló, hogy az atomok felfűtését itt is a plazmatérbe bevezetett mikrohullámú elektromágneses sugárzással végezzük, igaz, a háztartási mikrohullámú sütők szokásos 2,2 GHz (milliárd hertz) frekvenciája helyett 14,4 GHz frekvencián.

A felhevített plazmában a kisebb rendszámú atomokat (nagyjából a neonig) valamilyen elektronjától megfoszthatjuk. A nagyobb rendszámú atomok (például argon) esetén csupán néhány elektron marad. Az így létrehozott ionok sugárzása jellemzi a plazma állapotát. Különösen érdekes képet kapunk, ha a plazmáról egy nagyon kis átmérőjű lyukon átjutó sugárzást egy olyan érzékelőre vezetjük, amelynél azt is meg tudjuk mondani, hogy az érzékelő mely pontját érte a sugárzás, sőt a sugárzást ezen a ponton még az energiája szerint is analizálhatjuk. Ezen a módon lényegében lefényképezzük a plazmát. Lencseként a kis átmérőjű lyukat használjuk, mint a *camera obscura* esetében! Sőt, egy különleges színes képet készítenek, mert meg tudjuk mondani, hogy az érzékelő különböző pontjaira érkező sugárzásnak milyen az energia-



9. ábra • Az ATOMKI-ban működő ECR ionforrás fényképe

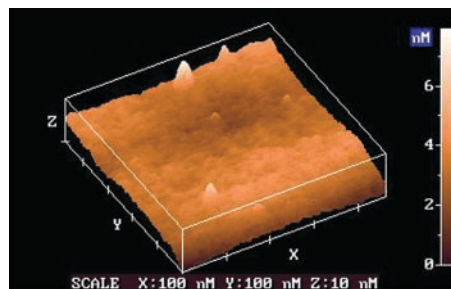


10. ábra • Az ECR ionforrásban előállított plazma röntgenfényképe

eloszlása. Az ECR argonplazmájáról készített ilyen kép a 10. ábrán látható, ahol a színek a sugárzás erősségét jelzik a szokásos módon, azaz a kék a kisebb, a piros a nagyobb intenzitást (S. Biri és mts, 2004).

*Tájkép csata után:
ionkráterek szilárd anyagok felületén*

Az ECR ionforrás nagy töltéssel rendelkező ionjai a plazmából kiszabadulva felgyorsíthatók, és ezekkel az ionokkal különleges kísérletek végezhetők. A 11. ábrán egy ilyen különleges kísérlet eredménye látható. Az ionforrásból elektronjai egy részétől (hús, illetve huszonnégy) megfosztott xenonionokat egy szelénfólia felületére vezetve az ionok becsapódhatnak a felületbe (S. Kökenyesi és mts, 2007). A felületet egy atomerő-mikroszkóppal megvizsgálva azt látjuk, hogy a becsapódó nagy-töltésű xenonionok a várt kráterek helyett kiemelkedéseket, 1-5 nm magas csúcsokat hoznak létre a szilárd test felületén. A jelenség pontos magyarázatát nem ismerjük. Sejtésünk szerint a sok elektronjától megfosztott ion a felület gyengébben kötött atomjaiból hozza létre ezeket a struktúrákat. További vizsgálatokat igényel, hogy a jelenség hogyan függ a becsapódó ionok kinetikus és poten-



11. ábra • A szelén felületére becsapódó, huszon-négyszeresen ionizált xenonionok keltette kiemelkedése atomerő-mikroszkópos képe.

ciális energiájának arányától. Leegyszerűsítve: a lassú, de nagy töltésű ionok vagy a kisebb töltésű, de gyorsabb ionok hozzák-e létre hatékonyabban ezeket a struktúrákat.

Elősegíti-e az élő szövetek fémeken való megtapadását egy különleges szénréteggel való bevonás?

Az ECR ionforrás plazmájában egy különleges anyag a szén hatvan atomot tartalmazó molekulája is bevezethető, és ezekből a különleges szénmolekulákból is előállíthatók ionok (S. Biri és mts, 2006). Ezeket a különleges ionokat az ionforrásból kivezetve és felgyorsítva felvihetjük különböző anyagok felületére. Különösen érdekesnek látszik olyan titán implantátumok ilyen anyaggal való bevonása, amelyeket élő szervezetbe beültetve, a különleges szénmolekulák elősegíthetik az élő szövetek megtapadását, vagy az implantátumon való szövetnövekedést. Az első kísérletek biztató eredményei után jelenleg nagyobb számban állítunk elő ilyen különleges szénrel bevont titántűket, amelyek a csontszövetbe helyezve – reményeink szerint – az élő szövetek erősebb és gyorsabb tapadását és növekedését eredményezik.

IRODALOM

- S. Biri, É. Fekete, A. Kitagawa, M. Muramatsu, A. Jánosy, J. Pálincás, „Fullerenes in ECR Ion Sources”, *Review of Scientific Instruments* 77 03A314. (2006)
- S. Biri, A. Valek, T. Suta, E. Takács, Cs. Szabó, L. T. Hudson, B. Radics, J. Imrek, B. Juhász and J. Pálincás, „Imaging of ECR plasmas with a pinhole x-ray camera” *Review of Scientific Instruments* 75 1420-1422. (2004)
- S. Biri, J. Vámosi, A. Valek, Z. Kormány, E. Takács and J. Pálincás, „The new ECR ion source of the ATOMKI: A tool to generate highly charged heavy ion plasma and beam”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 124 427-430. (1997)
- W. Jitschin, H. Kleinpoppen, R. Hippler and H. O. Lutz, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 12, 4077 (1979)
- S. Kökenyesi, I. Iván, V. Takács, J. Pálincás, S. Biri, I. Szabó, „Formation of surface structures on amorphous chalcogenide films”, *Journal of Non-cryst. Sol.* 353 (13-15): 1470-1473 (2007)
- L. Lederman and D. Teresi, „The God Particle – If the Universe is the Answer, What is the Question”, Houghton Mifflin Company, Boston, New York 1993.
- J. Pálincás, L. Sarkadi, and B. Schlenk, „L₃-subshell alignment in gold following low-velocity proton and He⁺ impact ionisation”, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 13, 3829-3834 (1980)
- J. Pálincás, L. Sarkadi, B. Schlenk, I. Török, Gy. Kálmán, C. Bauer, K. Brankoff, D. Grambole, C. Heiser, W. Rudolph, and H. J. Thomas, „Study of the L-shell ionisation of gold by 3.0 - 18.2 MeV nitrogen bombardment”, *J. Phys. B: Atom. and Molec. Phys.* 17, 131 (1983)
- J. Pálincás, R. Schuch, H. Cederquist, and O. Gustafsson, „Observation of electron-electron scattering in electron capture from He by fast protons”, *Phys. Rev. Lett.* 63 2464 (1989)
- L. Sarkadi, J. Pálincás, Á. Kövér, D. Berényi, and T. Vajnai, „Observation of the electron capture into the continuum states of neutral projectiles”, *Phys. Rev. Lett.* 62 527 (1989)
- L. H. Thomas, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A* 114, 561 (1927)
- P. A. Závodszky, L. Sarkadi, L. Viktor and J. Pálincás, „Observation of collisionally induced (1s2p²) ‘Pe shape resonance of He’”, *Phys. Rev. A* 50, R899 (1994)



CSILLAGOK ÉS ATOMMAGOK

Gyürky György

PhD, tudományos főmunkatárs
MTA ATOMKI, Debrecen
gyurky@namafia.atomki.hu

Kevés olyan tudományág létezik, amely a természet oly távoli objektumait kapcsolná össze, mint a nukleáris asztrofizika, vagy más néven mag-asztrofizika. A mag-asztrofizikai kutatások tárgyát ugyanis csillagok és atommagok képezik, a makro- és mikrokozmosz építőkövei, több millió kilométer átmérőjű gázgömbök és a milliméter milliárdod részénél is kisebb részecskék. Köztük azonban, mint látni fogjuk, szoros az összefüggés.

Energiatermelés és elemszintézis a csillagokban

Az emberiséget régóta foglalkoztatja az a kérdés, hogy a Nap, melynek éltető melege a földi élethez nélkülözhetetlen, hogyan termeli azt a hihetetlen mennyiségű energiát, melyet folyamatosan sugároz bolygónkra. Az ókori népek magyarázat hiányában még isteni tulajdonságokkal ruházták fel a fény és meleg égi forrását, később azonban a felvilágosult emberiség természettudományos magyarázatot igyekezett találni. Több elképzelés is született, miszerint például a Nap kémiai égés révén termeli az energiát (a Napot szénből állónak gondolva!), vagy pedig a gravitációs összehúzódás a kisugárzott energia forrása. Miután azonban a darwini evolúciós elmélet általánosan elfogadottá vált, a Nap energiatermelésének fenti lehetőségeit el kellett vetni. Az evolúcióelmélet értelmében ugyanis a fa-

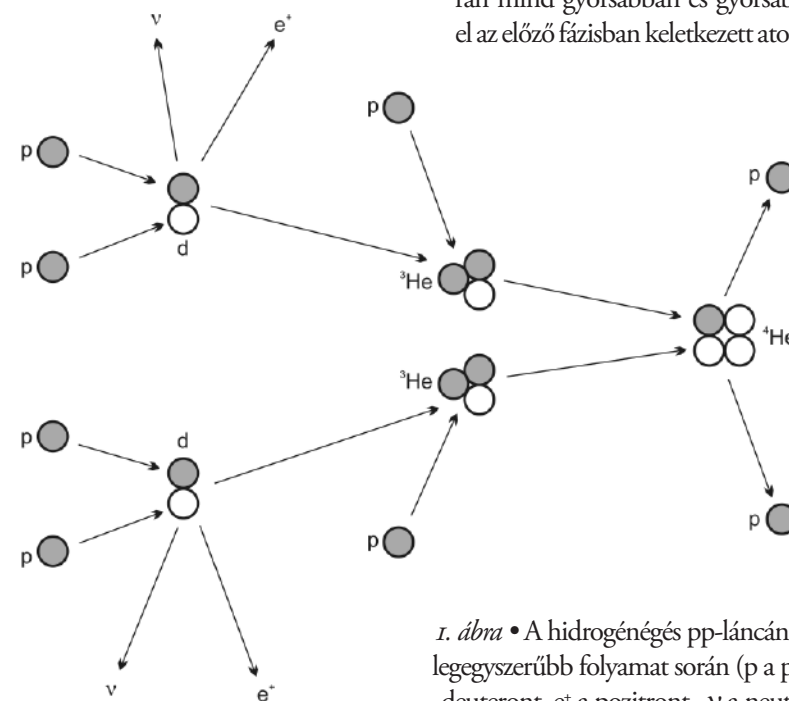
jok kialakulásához milliárd éves nagyságrendű idő szükséges (hasonlóan a Földön található egyes geológiai képződmények kialakulásához), és ilyen hosszú időn keresztül egyik javasolt energiaforrás sem képes fenntartani a Nap működését.

A megoldásra egészen a huszadik század elejéig várn kellett, korábban nem volt ismert olyan energiaforrás, amely elegendőnek bizonyult volna központi csillagunk működése számára. A huszadik század elején a fizika robbanásszerű fejlődése során Sir Ernest Rutherford feltárta az atomok szerkezetét, felfedezve az atommagot. A felfedezés után hamar kiderült az is, hogy az atommag hatalmas, a kémiai reakciókra jellemző energiáknál több nagyságrenddel nagyobb energiát tárol. Ez az energia magátalakulásokkal járó folyamatokban, magreakciókban fel is szabadítható, ebből adódik az a következtetés, hogy a Nap energiatermeléséért is magreakciók lehetnek a felelősek. A Nap színképeinek elemzésével megismerhetjük csillagunk kémiai összetételét. Ez alapján tudjuk, hogy a Napban legnagyobb arányban a periódusos rendszer két legkönnyebb eleme, hidrogén és hélium található. A hélium atommagja (az α -részecske) nagy kötési energiájú atommag, összetevőiből (két protonból és két neutronból) történő felépítése során jelentős energia szabadul fel. Kézenfekvő tehát, hogy a Nap belsejében

hidrogénatommagok (protonok) α -részecskévé történő egyesülése, fúziója termeli az energiát. Ebben a folyamatban azonban két protonnak neutronná kell alakulnia, ami a fizika egyik alapvető kölcsönhatása, a gyenge kölcsönhatás révén lehetséges. Mint nevéből is látszik, ez a kölcsönhatás csak kis valószínűséggel zajlik le, ennek (valamint a viszonylag alacsony hőmérsékletnek, lásd alább) köszönhető, hogy a Nap nem égeti el pillanatszerűen hidrogén üzemanyagát (óriási hidrogénbombaként felrobbanva), hanem évmilliárdokig tart a folyamat. Négy proton α -részecskévé való egyesülése egy többlépcsős folyamat eredménye, amelyben különböző magreakciók játszanak fontos szerepet. A folyamatot összefoglaló néven pp-láncnak nevezzük, s ma már több közvetett és közvetlen kísérleti bizonyítékunk van arra, hogy a Nap valóban e folyamat során termeli az energiát. Az 1. ábra

a pp-lánc legegyszerűbb és a Nap esetében legnagyobb jelentőségű folyamatát mutatja.

Napunk csak egyike a Tejútrendszer felépítő mintegy százmilliárd csillagnak, és a Tejútrendszer is csak egy a hasonló számú galaxisok közül. Kezdetben minden csillag a Naphoz hasonlóan a hidrogénégés révén termeli az energiát, ez a folyamat azonban csak addig folyhat, amíg elegendő hidrogén áll rendelkezésre a fúziós reakciókhoz. Ami ezután következik, azt a csillag tömege határozza meg. A legkisebb tömegű csillagok élete a hidrogénégés lezárultával véget ér, fokozatosan kihűlnék, és elhalványulnak. Napunk és a hozzá hasonló tömegű csillagok még a korábban megtermelt hélium fúziója révén újabb energiaforráshoz jutnak, mielőtt végleg befejezik működésüket. Nagyobb tömegű csillagok a fúziós energiatermelő reakciók egész láncolatán mennek végig, melynek során mind gyorsabban és gyorsabban égetik el az előző fázisban keletkezett atommagokat,



1. ábra • A hidrogénégés pp-láncának lépései a legegyszerűbb folyamat során (p a proton, d a deuteron, e^+ a pozitron, ν a neutrínót jelöli)

míg végül eljutnak a legstabilabb atommagok tartományába, a vascsoport elemeihez, ahonnan már nincs további lehetőség energiatermelésre. A fúziós reakciók e láncolata meghatározza a csillag észlelhető tulajdonságait is. A hidrogént égető, ún. fősorozati csillagokból a héliumégés során vörös óriás lesz, majd a megfelelően nagy tömegű csillag eljuthat a csillag életének a végét jelentő szupernóva-robbanásig. Jelen cikk keretein belül lehetetlen áttekinteni mindezeket a folyamatokat. Azt azonban fontos hangsúlyozni, hogy a csillagfejlődés minden egyes szakaszában magreakciók biztosítják az energiatermelést, s határozzák meg a fejlődés lehetséges további útját.

A csillagok nemcsak oly módon járulnak hozzá a földi élethez, hogy megtermelik az éltető energiát. A Világegyetemünket felépítő kémiai elemek, így a csontjainkban található kalcium, vagy a vérünk hemoglobinjában lévő vas, mind a természet vegykonyháiban, csillagok belsejében jött létre. Az Univerzum születésekor, az ősrobbanásban csak a legkönnyebb elemek, hidrogén, hélium és némi lítium keletkezett. Minden nehezebb elem a berilliumtól egészen az uránig fúziós reakciók során, csillagokban alakult ki. A csillagfejlődés fent említett folyamataiban a kémiai elemek újabb és újabb csoportjai jönnek létre, mígnem a teljes periódusos rendszer benépesül (beleértve a vasnál nehezebb elemeket is, melyek keletkezése ugyan nem járul hozzá a csillag energiatermeléséhez, ám főként neutronbefogási reakciók során ezek szintézise is lejajlik). Egy, az életet szupernóvaként befejező csillag ezután szétszórja a térbe a létrehozott kémiai elemeket (2. ábra). A csillagközi tér ezáltal dúsul fel nehéz elemekben, lehetővé téve többek között az élet kialakulását a később keletkező csillagok körül keringő, nehéz elemekből felépülő bolygókon.



2. ábra • A G292.0+1.8 jelű szupernóva-maradvány a Chandra-röntgenobszervatórium felvételén. A köd közepén felrobbant csillag belsejében korábban fúziós reakciók során kialakult kémiai elemek hatalmas sebességgel terjednek szét a csillagközi térbe a köd tágulása során. (A NASA/CXC/PennState/S. Park et al. és a Palomar Observatory DSS szíves hozzájárulásával)

A nukleáris asztrofizika tudománya

A nukleáris asztrofizika tudománya a fent vázolt folyamatokkal, az energiatermelés, a csillagfejlődés és az elemszintézis részleteinek megértésével foglalkozik a magfizika szemszögéből. A 20. század derekára összegyűlt magfizikai és csillagászati ismeretekre alapozva 1957-ben E. Margaret Burbidge, Geoffrey R. Burbidge, William A. Fowler és Fred Hoyle (és tőlük függetlenül Alastair G. W. Cameron) úttörő jellegű cikkükben felvázolták a csillagok elemszintézisének alapvető folyamatait. Némi egyszerűsítéssel ezektől a munkáktól eredeztethetjük a modern nukleáris asztrofizika kezdetét. Az elemszintézis részleteinek kidolgozásáért William A. Fowler 1983-ban elnyerte a fizikai Nobel-díjat.

A nukleáris asztrofizika azonban a magfizikán belül különleges helyet foglal el. A csillagok belsejében uralkodó hőmérséklet (15 millió kelvin a Nap magjában vagy néhány milliárd kelvin szupernóvák esetén) magfizikai szempontból alacsonynak tekinthető, ugyanis ezeken a hőmérsékleteken az atommagok mozgási energiája jóval kisebb, mint a magfizikai kutatásokban megszokott energiák. Az asztrofizikai szempontból lényeges magreakciókat tehát alacsony, a csillagokra jellemző energián kell vizsgálni. Ilyen energiákon a magreakciók valószínűsége a pozitív töltésű atommagok között fellépő taszító erő hatására igen kicsi (a gyenge kölcsönhatás szerepén kívül ez a másik ok, amiért a csillagok évmilliárdokig képesek fenntartani a működésüket). Ezeknek az alacsony valószínűségű magreakcióknak a tanulmányozása nagy kihívást jelent a kísérleti fizikus számára.

A csillagokban lejátszódó magreakciók földi körülmények között részecskegyorsítókkal vizsgálhatók. Általában nincs szükség nagy gyorsítóbereendezésekre, hiszen az alacsony energiás folyamatok kis energiájú gyorsítókkal is tanulmányozhatók. A magreakciókban keletkező részecskék és sugárzások detektálásával a vizsgált magreakció lezajlása megérthető. A kis valószínűséggel lejátszódó folyamatokban azonban alacsony intenzitású sugárzások detektálására van szükség, ami modern detektálási technikák alkalmazását és körültekintő kísérleti megvalósítást igényel.

Hazai mag-asztrofizikai kutatások

Az MTA debreceni Atommagkutató Intézetében (ATOMKI) dolgozik egy kis létszámú nukleáris asztrofizikai munkacsoport, melynek jelen cikk szerzője is tagja. Hazánkban jelenleg ez az egyetlen kutatócsoport, amely kísérleti mag-asztrofizikai vizsgálatokat végez.

A csoport a nukleáris asztrofizikán belül több különböző témával foglalkozik; alábbiakban két kutatási területéről írok részletesebben.

A vasnál nagyobb rendszámú elemek szintézise a csillagfejlődés előrehaladottabb szakaszaiban, sorozatos neutronbefogási reakciók révén zajlik. Neutronbefogási reakciókkal azonban nem állítható elő a nehéz elemek valamennyi stabil, a természetben létező izotópja. A 3. ábrán a különböző atommagok ábrázolására használatos, ún. nuklidtáblázat egy részlete látható az elemek arzéntől cirkóniumig terjedő tartományában. A vízszintes tengelyen a neutronszám, a függőlegesen a protonszám van feltüntetve, és a tartomány minden stabil izotópjának megfelel egy négyzet az ábrán. A legtöbb stabil izotóp a neutronbefogási reakciók két különböző folyamata, az s-, illetve r-folyamatokon keresztül jön létre (az s és r betű a neutronbefogás gyorsaságára utaló slow [lassú], illetve rapid [gyors] szavak kezdőbetűje). Található azonban a nuklidtáblázat bal felső, protongazdag oldalán összesen 34 olyan izotóp (az ábrán 3 látható, sötét háttérrel és p betűvel jelölve), melyek nem keletkezhetnek neutronbefogási reakciók során. Ezen ún. p-izotópok (vagy p-magok) keletkezési mechanizmusa az asztrofizikai p-folyamat (Arnould – Goriely, 2003). A p-folyamatban, amelynek a kísérleti vizsgálata az ATOMKI nukleáris asztrofizikai csoportjának egyik fő feladata, protonokban gazdag atommagok jönnek létre.

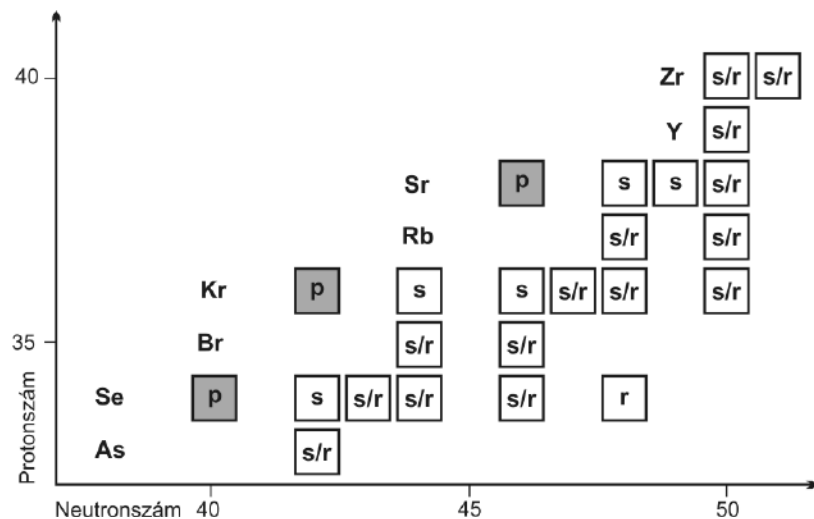
Egészen a legutóbbi évtizedekig nem volt tisztázott, hogy pontosan milyen folyamatok vezetnek a p-magok szintéziséhez. A ma elfogadott elmélet szerint a p-izotópok szupernóva-robbanásban keletkeznek főként gamma-fotonok által indukált reakciók révén. A robbanás során a csillagban olyan magas hőmérséklet uralkodik, hogy a hőmérsékleti

sugárzás gamma-fotonjai magreakciókat válthatnak ki. A nagyenergiás gamma-fotonok nehéz magokból neutronokat üthetnek ki, és sorozatos ilyen reakciókban létrejöhetnek a neutronszegény p-izotópok. A folyamat részletei igen bonyolultak, a neutronkilökési reakciókon kívül szerepet kapnak más, például proton vagy alfa-részecske kibocsátásával járó reakciók is. Jelenleg a p-folyamatra vonatkozó számítások még nem képesek reprodukálni a természetben található p-magok gyakoriságát, és ennek egyik lehetséges oka a szükséges magfizikai ismeretek hiányában keresendő.

Az ATOMKI-ban a p-folyamat jobb megértése érdekében végzünk kísérleti vizsgálatokat. Mivel a gamma-indukált reakció közvetlen tanulmányozása technikailag igen nehéz, így a reakció időbeli fordítottját, inverzét vizsgáljuk. Gamma-indukált reakció esetén a gamma-foton váltja ki a reakciót, amelynek eredményeképpen részecske lép ki. Ennek az inverze a befogási reakció, ahol egy részecske váltja ki a reakciót, és gamma-sugárzás lép ki.

A befogási reakció tanulmányozásával következtetést vonhatunk le az inverz, gamma-indukált reakció tulajdonságaira is. Vizsgálatainkkal a töltött részecskék (protonok és alfa-részecskék) befogási reakcióira koncentrálnak.

A méréseket az adott folyamatra jellemző asztrofizikai energiatartománnyal egybeeső energiákon célszerű elvégezni. Az asztrofizikai p-folyamat esetén a jellemző energiatartomány lefedhető az ATOMKI gyorsítóberendezéseivel. Méréseinkhez tehát az ATOMKI Van de Graaff- és ciklotron típusú gyorsítói szolgáltatták a szükséges proton-, illetve alfa-részecske-nyalábokat. Az ATOMKI gyorsítói a 4. ábrán láthatók. Számos, a p-folyamat szempontjából lényeges befogási reakció magfizikai „valószínűségét”, úgynevezett hatáskeresztmetszetét mértük meg az elmúlt években (például Gyürky et al., 2006). Eredményeink felhasználhatók az asztrofizikai p-folyamat modellszámításaiban, így hozzájárulhatunk az elemszintézis e kevésbé ismert folyamatának jobb megértéséhez.



3. ábra • A nuklidtáblázat egy részlete. A négyzetek jelölik a stabil izotópokat a bennük lévő betűk pedig az elemszintézis keletkezésükhöz vezető folyamataira utalnak (s-, r- ill. p-folyamat)



4. ábra • Az ATOMKI nagyberendezései: a ciklotron (balra) és a Van de Graaff-típusú részecskegyorsító (jobbra). Az intézetben végzett nukleáris asztrofizikai kísérletekhez e két gyorsító szolgáltatja a részecskenyalábokat.

Asztrofizikai laboratórium a Föld felszíne alatt

Bár az ATOMKI gyorsítói kiválóan alkalmazkodik alacsony energiás magfizikai és mag-asztrofizikai kísérletek elvégzésére, a nukleáris asztrofizika egyes területein lényeges magreakciók vizsgálatához más feltételeknek eleget tevő kísérleti berendezések szükségesek. Ezért asztrofizikai kutatásaink egy részét nemzetközi együttműködés keretein belül, külföldi laboratóriumokban végezzük.

Az 1. ábra a Nap hidrogénégési reakcióinak csak legvalószínűbb láncolatát mutatja be, emellett több más úton, számos egyéb magreakció részvételével is lejátszódhat négy proton alfa-részecskévé történő fúziója. Mindezen reakciók közös jellemzője, hogy a Nap belsejében igen alacsony energián mennek végbe, és a reakciók lejátszódási valószínűsége – hatáskeresztmetszete – extrém alacsony. Az ilyen reakciók kísérleti vizsgálatát

tehát alacsony energiát biztosító gyorsítókkal lehet elvégezni, a kísérleti technikát pedig az alacsony hatáskeresztmetszetek mérésére kell optimalizálni. A debreceni nukleáris asztrofizikai csoport tagjai részt vesznek a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) nemzetközi együttműködésben. Az együttműködés célja extrém alacsony hatáskeresztmetszetű reakciók, főként a hidrogénégési reakcióinak a kísérleti vizsgálata.

Olaszországban, a Gran Sasso Nemzeti Laboratóriumban üzemelteti a LUNA-együttműködés azt a 400 kV terminálfeszültségű elektrosztatikus gyorsítót, amit a kísérletekhez használunk. A gyorsító alacsony energiájú és nagy intenzitású részecskenyaláb előállítására alkalmas. A nagy intenzitású nyaláb az egyik feltétele az alacsony hatáskeresztmetszetű reakciók vizsgálatának, ugyanis nagyszámú bombázórészecske biztosítja azt, hogy a kis valószínűségű folyamatok is jó eséllyel észlelhetők legyenek (a LUNA-gyorsító ese-

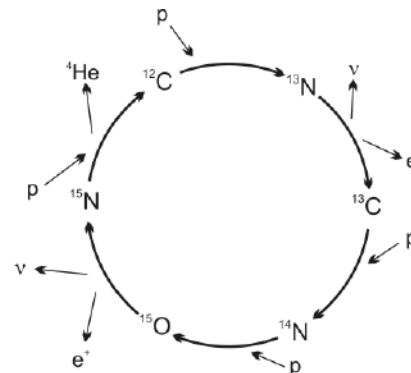
tén például másodpercenként nagyságrendileg 10^{15} részecske bombázza a céltárgyat). Egy reakció hatáskeresztmetszetét a reakcióban keletkező gamma- vagy részecsquesugárzás detektálásával lehet megmérni. Egy kis hatáskeresztmetszettel lejátszódó reakció során ez a sugárzás általában igen kis intenzitású, aminek a detektálása nehéz feladat. A laboratóriumban jelen lévő környezeti radioaktivitásból származó vagy kozmikus eredetű sugárzás intenzitása jelentősen meghaladhatja a mérni kívánt reakcióból származó sugárzást, lehetetlenné téve így módon a pontos mérést. Fontos követelmény tehát a háttérsugárzás valamilyen módszerrel történő csökkentése. Míg a környezeti radioaktivitásból származó háttér csökkentése viszonylag egyszerűen megoldható alacsony belső aktivitású árnyékolóanyag használatával, addig a nagy áthatolóképeségű kozmikus sugárzás leárnyékolása nehezebb feladat, amely leghatékonyabban a kísérlet föld alá telepítésével oldható meg. Az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratórium a világ legnagyobb föld alatti kutatóintézet. A laboratórium fölötti mintegy 1400 méter vastag szikla elegendő arra, hogy a kozmikus sugárzást sok nagyságrenddel csökkentse, kiváló feltételeket teremtve ezzel olyan kutatások számára, ahol a kis valószínűségű események észlelését a kozmikus sugárzás a föld felszínén nem tenné lehetővé. Az itt található LUNA-gyorsító jelenleg a világ egyetlen föld alatti laboratóriumban működő gyorsítója, ami egyedülálló lehetőséget biztosít nukleáris asztrofizikai kutatások számára.

Az utóbbi években több nagy jelentőségű reakció vizsgálatában vettünk részt az együttműködés keretében. Ezek közül két példát említek. A ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ folyamat a Nap hidrogénégésének egyik kulcsreakciója.

Bár kisebb valószínűségű, mint az 1. ábrán is látható ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + \text{p}$ reakció, ám ez a folyamat vezet a Nap belsejében a ${}^7\text{Be}$ és a ${}^8\text{B}$ magok termeléséhez, amelyek radioaktív β -bomlásából származnak a földi neutrínó-detektorok által észlelt nagyenergiás neutrínók. A neutrínók földi detektálása jelenti a napmodellek egyik legérzékenyebb ellenőrzési lehetőségét, így a neutrínófluxus nagyságát befolyásoló magreakciók pontos ismerete igen lényeges. A LUNA-együttműködés méréseiben sikerült a ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ reakció hatáskeresztmetszetét minden korábbinál alacsonyabb energián és nagyobb pontossággal megmérni, jelentősen csökkentve ezáltal a napneutrínók számított fluxusának bizonytalanságát (Gyürky et al., 2007).

A pp-láncon kívül a hidrogénégés folyamata lejátszódhat egy másik folyamat, az ún. CNO-ciklus reakcióin keresztül is. Bár a nap esetében a CNO-ciklus csak mintegy 1,5%-át adja a megtermelt energiának, nagyobb tömegű csillagok esetén ez a ciklus a hidrogénégés fő mechanizmusa, és az ebben szereplő magreakciók tulajdonságai szabják meg a csillag fejlődési folyamatát. A ciklus, melynek lépéseit az 5. ábra szemlélteti, legfontosabb tagja a ${}^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$ reakció, ugyanis ennek a legalacsonyabb a hatáskeresztmetszete, így ez a reakció szabja meg az egész ciklus lezajlásának valószínűségét.

A fent tárgyalt ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ reakcióhoz hasonlóan a ${}^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$ reakció kísérleti vizsgálata is nehéz feladat az alacsony hatáskeresztmetszet miatt. Egy föld alatti alacsony energiás és nagy intenzitású nyalábot biztosító gyorsító e reakció tanulmányozásában is komoly előnyt jelent. A LUNA-együttműködés keretében tehát – kihasználva a föld alatti gyorsító által kínált egyedülálló lehetőségeket – a ${}^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$ reak-



„CONTROLLARE” NECESSE EST – SZABÁLYOZNI SZÜKSÉGES

Keviczky László

akadémikus, Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet
keviczky@sztki.hu

Bevezetés

Első nyilvános szereplésem az Akadémián, mint a legfiatalabb intézeti igazgató még mindig emlékezetes számomra. Végighallgatva pályatársaim és vezetőink gondjait, mint egykori latinos, hozzászólásomban felhasználtam a klasszikus idézetet: „Navigare necesse est”. Mindenki tegye a dolgát, kutatni kell, az eredményesség a részsikerek összessége, és vállaltam a rám eső részt. Mivel ezt akkor főtitkárunk később sokat idézte, ezért találtam ki a cím mesterséges idézetét, ami logikus jellemzése lehet az alábbiakban bemutatandó témának. (Sajnos az eredeti latin szóközlésben nincs pontos megfelelő az angol „control”-ra, ezért az on-line etimológiai szótárakra támaszkodva vettem a bátorságot a „controllare” szó használatára, ami inkább az olasz utód nyelvből ered, de legalább érthető.) A cikket felkérésre írom és főleg azért vállaltam el, mert szakterületünkéről még szinte semmi nem jelent meg a Magyar Tudományban. Mindenkihez szeretnék szólni, nem örülnék, ha bölcsész kollégáim továbblapoznának, talán számukra is fogok érdekességeket írni.

Valóban, mai megszokott kényelmes életünk szinte elképzelhetetlen az automatikusan működő készülékek, berendezések, folyamatok nélkül. Ez sokszor nem nyilvánva-

ló, hiszen mindenki ahhoz szokott, hogy „gombokat” nyomogat a korszerű vagy kevésbé korszerű eszközein, tehát kikapcsol, bekapcsol, beállít: az utasításait végrehajtó technológia láthatatlan, rejtett. Ezért nem is várható senkitől, hogy végiggondolja, hány szabályozási kör, vezérlési folyamat indul el, amikor egy rádió, televízió, video, DVD szórakoztató vagy kényelmi berendezés működik, vagy az olyan egyszerű rendszerek esetében, mint vasaló, melegvíztároló, vagy az egyedi gázfűtés. Az pedig még inkább a szakterületekre tartozik, hogy milyen belső szabályozási körök tartják életben az élőlényeket, szabályozzák a kereslet-kínálat viszonyát vagy éppen földünk globális környezeti folyamatait. A szórakoztatóipar eszközeiben néhány tucat, a repülőgépeken néhány száz, a nagyipari folyamatokban néhány ezer szabályozás működik állandóan napjainkban: biztosítva az elvárt szolgáltatást, minőséget vagy a környezetet nem veszélyeztető stabilitást.

Már egész fiatal korunkban megtanuljuk, hogy van olyan berendezés, ami nem működik szabályozás nélkül: ez a kétkerekű bicikli. Ha nem hajtunk és kormányozunk, akkor elesünk, ami az instabilitás közvetlen fájdalmas élményét szolgáltatja. Az ujjhegyen egyensúlyozott esernyő, pálca próbálkozásaikor még senki nem gondol arra, hogy dina-

mikailag igen hasonló a probléma a repülőgépek levegőben tartásához, és ez a gondolat legközelebb már csak a felnőttkori utazásoknál jöhet elő ismét, különösképpen, ha félünk a repülőgépen (mint én). Nem sokan próbálkoztak két esernyőt, két pálcát egyensúlyozni egymáson, vagy egykerekű biciklit hajtani. Ezt csak a zsonglőrök, különleges képességű emberek tudják megtenni. Ez a képesség pedig már a repülő berendezések közül is a labilisabbak, a helikopterek irányításához kell. Az említett műszaki-technológiai feladatok megoldása ma már a szabályozástechnika hagyományos kurzusain elsajátítható és a számítógépek segítségével szinte rutinszerűen megoldható.

Alapfogalmak

Szakterületünket röviden leginkább rendszer- és irányításméletnek (-technikának) nevezik szerte a világban. Vulgárisabb elnevezés az automatizálás, ami sokkal jobban érthetőbb, de jelentése jóval korlátozottabb, mint az előző meghatározás. A továbbiakban, bár többnyire műszaki rendszerek irányítási folyamatait tárgyaljuk, törekedni fogunk arra, hogy a leírtakat minden tudományterület képviselője megértse. Az ipari termelési folyamatok irányításának lényeges szerepe van a jobb termékminőség biztosításában, az energiatárolás minimalizálásában, a biztonság növelésében, a környezetszennyezés csökkentésében.

Az anyagi javakat előállító termelési folyamatokban anyag- és energiaátalakítási folyamatok mennek végbe. Irányítással biztosítani kell e folyamatok megfelelő elindítását, fenntartását, leállítását. Egy hőerőműben például a szén kémiai energiája az elégetéskor hőenergiává alakul át. A hőt gőz előállítására használják fel. A gőz meghajtja a gőzturbinát, mechanikai forgási energia jön létre. A tur-

bina forgatja a szinkrongenerátor forgórészét az állórész mágneses terében. Ezáltal villamos energia jön létre. Ezeket a folyamatokat előírt mederben kell tartani. A folyamatokat el kell indítani, működésüket megadott előírásoknak megfelelően kell fenntartani. Az energiatermelési folyamatnál biztosítani kell például, hogy a változó napi terhelés ellenére a villamos energia előírt feszültségen és frekvencián előírt pontossággal álljon rendelkezésre. A folyamatok leállítását is biztonságosan kell végrehajtani.

A folyamatok kívánt fenntartása különböző fizikai mennyiségek állandó értéken tartását vagy adott törvényszerűség szerinti megváltoztatását jelenti. Ilyen fizikai mennyiségek lehetnek például egy közeg hőmérséklete, nyomása, egy anyag összetétele, egy gép fordulatszáma, egy tengely szöghelyzete, egy tartály folyadékszintje stb. Az irányítás olyan művelet, amely valamely folyamatba annak elindítása, fenntartása, megfelelő lefolyásának biztosítása, megváltoztatása vagy megállítása végett beavatkozik.

Az irányítás alapja a folyamatról, illetve környezetéről való információszerezés, megfigyelés, érzékelés, mérés útján. A különböző fizikai mennyiségek méréséhez mérőműszerekre van szükség. Az irányítási cél ismeretében és a folyamatról, illetve környezetéről szerzett információ alapján döntést hozunk a folyamatba történő megfelelő beavatkozásra. Az irányítás műveletére jellemző, hogy nagy energiájú folyamatokat rendszerint kis energiájú hatásokkal befolyásol. Az irányítástechnika az irányítási rendszerek törvényszerűségeivel, az irányítási műveletek vizsgálati módszereivel, az irányítási rendszerek tervezésével, megvalósításával foglalkozik.

Az irányítási folyamat a következő műveletekből áll (*1. ábra*).



1. ábra • Az irányítási rendszer működési vázlata

Érzékelés: információszerzés az irányítandó folyamatról és környezetéről • Ítéletalkotás: az értesülés feldolgozása és az irányítási cél alapján döntéshozás a rendelkezés szükségességéről: szabályozó algoritmus • Rendelkezés: utasítás a beavatkozásra, parancs kiadása: az irányított folyamat befolyásolása a rendelkezés alapján.

Ha az információt nem közvetlenül az irányított jellemző érzékelésével nyerjük, vezérlésről vagy nyílt hurkú irányításról beszélünk. Vezérlésre példa a mosógép időprogram szerinti irányítása az egymást követő műveletek (öblítés, mosás, centrifugálás) elvégzésére. A kimenőjelet (a ruhák tisztaságát) nem mérjük. Ha egy terem fűtését a külső hőmérséklet értékétől függetlenül állítjuk, ugyancsak vezérlésről van szó.

Ha az információt az irányított jellemző mérésével kapjuk, szabályozásról vagy visszatartott zárt hurkú irányításról van szó. A 2.

ábra egy szabályozási kör működési vázlatát adja meg. A szabályozás alapja a negatív visszacsatolás (feedback), a rendelkezés az alapjel és a visszacsatolt érzékelt szabályozott jellemző értékének összehasonlítása révén jön létre. (A szabályozás általános problematikájának többféle sémája létezik, de mindegyik lényege a visszacsatolás.) Megjegyezzük, hogy a negatív visszacsatolás számos szakmában ismert a kognitív pszichológiától, a tanulási felismerési folyamatokon keresztül alapvető orvos-biológiai, környezeti és fizikokémiai rendszerekig.

A vezérlés és a szabályozás összehasonlítása

Ha a beavatkozási és az irányított jellemző közötti kapcsolat pontosan ismert és az irányítási hatáslánc valamennyi eleméről és a zavaró jellemzőkről megbízható információk állnak rendelkezésre, a vezérlés jó irányítást



2. ábra • A szabályozás működési vázlata

biztosíthat. Ha azonban ismereteink a rendszerről és a zavarásokról pontatlanok, a vezérlés működése nem lesz kielégítő. A vezérlés olcsó irányítási lehetőséget biztosít, mivel nem alkalmaz költséges érzékelő berendezéseket az irányítandó mennyiség mérésére, hanem előzetes ismereteket vagy külső mennyiségekről kapott információt használ fel az ítéletalkotáshoz. Vezérléskor nem lépnek fel stabilitási problémák.

A zárt hurkú szabályozás költségesebb, mint a vezérlés. Az irányított jellemzőt érzékelő műszerrel mérjük, és a beavatkozás az alapjel és az érzékelt kimenőjel eltérése alapján történik. A szabályozás képes az alapjel követésére és a zavarások elhárítására. Mivel a szabályozott jellemző értékét befolyásolják a zavarások, a szabályozás elhárítja az előre nem ismert zavarások hatását, és kompenzálja a folyamat modelljének pontatlanságából eredő paraméter-bizonytalanságok hatását is. A szabályozás működésbe lép a kimenőjelenek a kívánt értéktől való eltéréseinek kiküszöbölésére, akármilyen hatás okozta is az eltérést. A negatív visszacsatolás következtében azonban stabilitási problémák léphetnek fel, a rendszerben nemkívánatos lengések jöhetnek létre. A rendszer stabilitása a szabályozó megfelelő tervezésével biztosítható.

Egy kis történelem

A negatív visszacsatolás alkalmazása nem új elv, már az ókori görögök is alkalmazták. Viszszatekintve a szabályozástechnika fejlődésének történetére, néhány tendenciát figyelhetünk meg. A negatív visszacsatolás alkalmazása mérnöki feladatok megoldásához kapcsolódik. A szabályozástechnika fejlődése szorosan kötődik azokhoz a gyakorlati feladatokhoz, amelyek az emberiség történetének egy-egy szakaszában megoldásra vártak. A történelem

egyes korszakai, amelyek jelentős befolyással voltak a szabályozástechnika fejlődésére:

- az ókori görög és arab kultúra (ie. ~300 – ~1200),
 - az ipari forradalom kora (1700-as évek, de a kezdetek már 1600 körül),
 - a távközlés kezdetei (1910-1945),
 - a számítógép megjelenése, az úrkutatás kezdete (1957–),
 - az irányítás-, számítástechnika és kommunikáció összeolvadása, magas szintű intelligencia megjelenése a döntésekben (2000–)
- E korszakokat tekintve megállapíthatjuk, hogy az ember először a helyét kereste térben és időben, majd igyekezett környezetét alakítani és életét kényelmesebbé tenni, ehhez hozzájárult az ipari termelés. Ezután a kommunikációt is felhasználva megalapozza helyét, helyzetét a társadalomban, majd igyekszik kapcsolatot teremteni a világmindenséggel.

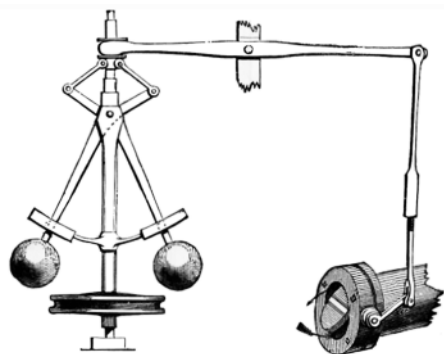
Már az ókori görögök is használtak különböző automatákat. Az egyik első szabályozási rendszer az alexandriai *Ktészipiosz* vízórája volt (i.e. 270). A szerkezet úszót használt egy tartály szintjének érzékelésére és állandó értéken tartására. Ha a tartályban a víz szintje csökkent, egy szelep nyitott, és a tartály újratöltődött. Az állandó szint biztosította a tartályból kifolyó víz mennyiségének állandó értékét. A kifolyó víz egy második tartályt töltött. Ez a tartály az idővel arányosan töltődött. A bizánci *Philón* (i.e. 250) szintén úszós szabályozót használt egy olajlámpa olajszintjének szabályozására. Az alexandriai *Hérón* (Kr. u. i. sz.) is hasonló szerkezeteket alkalmazott szintszabályozásra, boradagolásra, templomajtók nyitására, stb.

Az arab mérnökök 800 és 1200 között számos úszós szabályozószervezetet használtak. Feltalálták az állásos – ki/be kapcsolással működő – szabályozásokat is.

A mechanikai óraszerkezetek feltalálásával az úszós vízórák elfelejtődtek. A szabályozás elve az ipari forradalom idején talált újabb alkalmazásokra.

Az ipari forradalom korában számos ön-működő berendezést találtak fel; ezekben automatikus szint-, hőmérséklet-, nyomás- és sebességszabályozási feladatokat oldottak meg. Már az 1600-as évektől kezdődően voltak különböző szabályozási alkalmazások (szélmal-mok fordulatszám-szabályozása, kemencék hőfokszabályozása [Cornelis Drebbel], nyomás-szabályozás [Papin] stb.). Az ipari forradalom kezdetét a gőzgép feltalálása jelzi (Savery és Newcomen, ~1700). Az első ipari szabályozás-nak James Watt centrifugálszabályozója tekint-hető, amelyet a gőzgép fordulatszám-szabályo-zására alkalmazott (3. ábra). A centrifugálérzé-kelő helyzete a gőzgép fordulatszámától függ. Az érzékelő a mozgó emelőkaron keresztül állítja a gőzdugattyú helyzetét, befolyásolva a gőzgépbe beáramló gőz mennyiségét és ez-által a gőzgép fordulatszámát. (Érdekesség-ként megemlítjük, hogy még közel száz év telt el, mire Maxwell megadta a rendszert pon-toosan leíró differenciálegyenletek rendszerét.)

Az ipari forradalom után a szabályozástechnika fejlődésében lényeges előrelépést jelen-tett a szabályozási körök matematikai leírása



3. ábra • Centrifugálszabályozó

módszereinek megadása, ami lehetővé tette a szabályozási rendszerek viselkedésének szigo-rúbb és pontosabb vizsgálatát.

A szabályozástechnika újabb fejezete kezdő-dött a telefon feltalálásával, és a visszacsatolt műveleti erősítők alkalmazásával az informá-ció továbbításakor fellépő csillapítás kompen-zálására. A második világháború idején szá-mos precíziós szabályozási rendszert dolgoz-tak ki, automata repülésirányítási rendszereket, radarantenna-beállító rendszereket, tengeralatt-járók irányító berendezéseit stb. Ezek a tech-nikák azután később az ipari termelésben is alkalmazást nyertek.

A számítógépek elterjedése új korszakot nyitott a szabályozási rendszerek fejlődésében. A számítógép nemcsak mint külső eszköz je-lenik meg, amellyel a tervezés körültekintő-ben és könnyebben elvégezhető, hanem valós idejű alkalmazásokban a szabályozási kör részét képezi. A folyamat és az azt irányító számítógép perifériákon keresztül kapcsolód-nak egymáshoz, és szoftveres úton minden mintavételezési időpontban kiszámított be-avatkozó jel kerül a folyamat bemenetére. A számítógép tehát a szabályozási kör szerves része. Megjelentek az ilyen szintű működést biztosító hardver- és szoftverelemek.

A folytonos szabályozási rendszerek mel-lett egyre nagyobb teret nyertek a számítógé-pes folyamatirányítási rendszerek, ilyenkor a folyamat és a folyamatirányító számítógép A/D és D/A (analóg/digitál, digitál/analóg) átalakítókön keresztül kapcsolódik egymás-hoz. A szabályozás lényeges funkcióit a számí-tógép végzi valós időben, mintavételi időkö-zönként megismételve. Ipari folyamatirányítá-sokban elosztott irányítási rendszereket hoztak létre, ahol a térben elosztott irányítási rendsze-rek egymással kommunikálva összehangoltan működnek.



A legkorszerűbb repülőgépeken (pl. Airbus sorozat) több-ségében már nem-csak (elektro)mecha-

nikus szerkezetek továbbítják a pilóta (robot-pilóta) parancsait, hanem redundáns, több-szörös működésű számítógépes hálózatok (fly-by-wire). Ez az átalakulási folyamat lassan megjelenik a legmodernebb autókban is. Az autópályákon való közlekedés automatizálá-sa pedig napjaink részeredményeiben már látható érdekes feladata.

Megjelentek a precíziós feladatokat végző ipari robotok. A robot egy számítógép által vezérelt automatizált gép. A robotokban sok-szor emberi tulajdonságokat utánoznak, pl. robotmanipulátoroknál a kéz mozgását képe-zik le. A mozgó robotokat bizonyos intelligen-ciával igyekeznek felruházni, mint pl. a térben való mozgáskor az akadályok felismerése és elkerülése.

Az űrkutatás újabb kihívást jelent a szabá-lyozási rendszerekkel szemben. Az űrrepülő-gépek, mesterséges űrobjektumok pályára állítása, célba juttatása igen pontos, a körülmé-nyekhez alkalmazkodni tudó, tanuló szabályo-zási rendszereket igényel, amelyeknél rendkívül fontos a biztonságos működés.

A szabályozásmélet a szabályozási rend-szerek felépítésével, analizisével és szintézisével foglalkozik. A szabályozásmélet klasszikus korszaka (~1960-ig) megadta a negatív vissza-csatoláson alapuló szabályozások működésé-nek, analizisének és szintézisének alapelveit.

A szabályozásmélet modern korszaka (~1960-1980) az irányítási rendszerek állapot-változós leírására és az ezen alapuló tervezési módszerekre fektetett hangsúlyt.

Az 1970-80-as években olyan tanuló, pa-raméteradaptív irányításokat igyekeztek ki-

fejleszteni, amelyek változó körülmények kö-zött is mindig optimálisan látják el feladatu-kat. Ez az időszak nagy lökést adott a folyamat-modellek identifikációs, becslési eljárásainak.

Az utolsó évtizedben a robusztus, a para-méterváltozásokra kevésbé érzékeny, megbíz-ható szabályozások tervezése került előtérbe. A nemlineáris rendszerek irányítása, a környe-zet változásait felismerő, azokhoz alkalmaz-kodó intelligens, tanuló rendszerek, a hálózati összekapcsolást messzemenően felhasználó irányítási rendszerek alkalmazása újabb táv-latokat nyit a szabályozástechnikában.

A szabályozástechnika napjainkban is di-namikusan fejlődik. Az újabb eszközök és technikák újabb elméleti kérdéseket vetnek fel, és újszerű alkalmazásokat tesznek lehetővé. A korszerű érzékelők (nagy pontosságú kame-rák, mikroszkópok, a legkülönbözőbb anyag-tulajdonságok, mint összetétel vagy mozgás-paraméterek, mint sebesség, gyorsulás, hely-zet, stb.) elérhetővé válásával, vagy ezek kom-binálásával (érzékelő tömbök, array detectors) a hagyományos irányítási feladatok fölé tele-pülő intelligens döntések lehetősége minden-napunk gyakorlatává vált. A marsjáró robot automatikája nem képzelhető el magas szín-tű intelligencia nélkül: érzékeli helyzetét, kör-nyezetét, lehetőségeit, és küldetésének keretei között maga oldja meg az irányítás feladatát.

Interdiszciplináris megközelítés

Az irányítástechnika interdiszciplináris tudo-mányterület. A folyamat működését meg kell érteni, ehhez fizikai, kémiai, biológiai stb. ismeretekre van szükség. Matematikai ismere-tekre van szükség a modellezéshez, az analizis-hez és a szintézishez. A szabályozási kör vizsgálatához ismeretekre van szükség a jelekről, rendszerekről, a negatívan visszacsatolt rend-szerek viselkedéséről. A tervezés során józan

megfontolásokat és alapvető korlátozásokat is figyelembe kell venni. A tervezésnek ki kell terjednie a gazdaságossági, biztonsági, környezetvédelmi stb. szempontokra is. Egy bonyolultabb irányítási feladat megoldásához sokszor különböző szakemberek összehangolt munkájára van szükség. Mivel a gyakorlati realizáció egyre többször digitális számítógépen történik, ezért az informatikus szakember szerepe döntő.

Az interdiszciplináris jelleg alatt értjük azt is, hogy számos tudományterület használja az irányításelmélet fogalmait és tudja magyarázni létfontosságú jelenségeit. Az emberi szervezet vérnyomás-, vércukor-, bizonyos hormon-háztartási jellemzőinek a szabályozása bonyolult többváltozós szabályozási kérdés, amit legalább olyan nehéz beállítani, mint egy műszaki rendszerben. Ki gondolná, hogy egy logisztikai raktárirányítás, a piac kereslet-kínálat szabályozása és egy tartály szintszabályozása teljesen hasonló analóg probléma?

Az irányításelmélettel kéz a kézben haladó rendszerelmélet gondolkodási módja, mely szerint folyamataink dinamikusak, azoknak bemenőjelei, kimenőjelei és belső állapotváltozói vannak, nagyon jó sorvezetőt és alapvetően racionális megközelítést és módszertant nyújtanak számos tudományterületnek.

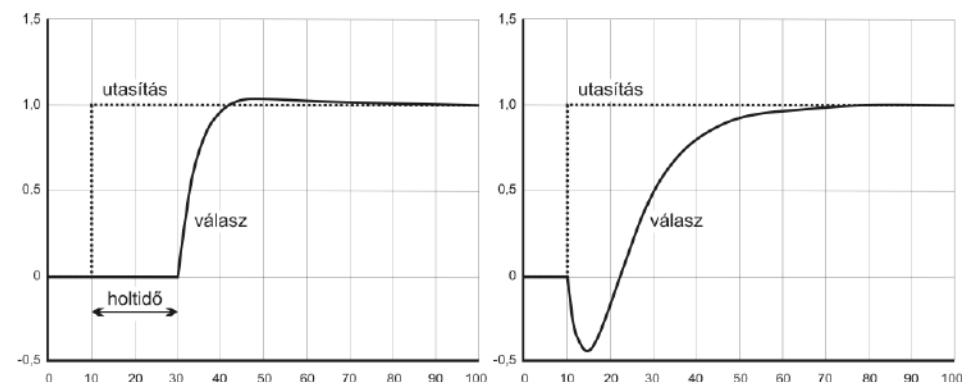
A szabályozás korlátai

Az optimista kép ellenére sajnos nem tudunk mindent megoldani a szabályozástechnika segítségével. Az irányítandó folyamat igen sokszor lomha, tehetetlen, dinamikailag lassú, amit fel szeretnénk gyorsítani. Erre csak az ad lehetőséget, hogy a parancsok teljesítésekor rövidebb-hosszabb időre extra energiát (túlvezérlést) kell a folyamatba bejuttatni a zárt szabályozási kör szerint számított mértékben. Ennek azonban rendszerint technikai akadá-

lya van. Ha valaki már látta a Barátság kőolajvezeték óriási elzáróselepét, az mindjárt megérti, hogy ezt nem lehet néhány másodperc alatt elzárni vagy ki-be kapcsolgatni. Ez egy végletes példa, de nem kell nagy fantázia ahhoz, hogy a feladat jellegétől függően, a beavatkozást végző berendezés függvényében az említett extra energia bevitel nem lehet akár mekkora. Gyakorlatilag ez a korlát meghatározza, hogy milyen gyorsítást tudunk a folyamaton elvégezni. A harci repülőgépek fordulékonyaságát pedig rendszerint nem technikai korlátok, hanem az emberi szervezet tudatvesztés nélkül elviselni képes „g-terhelése” határozza meg.

A megoldás bizonyos esetekben nem tőlünk, hanem a folyamattól függ, amit irányítani akarunk. Érdekes módon nem az önmagában labilis folyamatok (lásd az egyensúlyozott pálca, szaknyelven fordított inga) stabilizálása, megfelelő szabályozása az igazi probléma, mert a stabilizálás rutinfeladat. A folyamat más dinamikai tulajdonságai viszont alapvető fontosságúak és megváltoztathatatlanok: ezeket invariáns tulajdonságoknak nevezzük és elméletileg sem várható, hogy hatásukat kiküszöbölhessük. Ezek közül bemutatunk kettőt.

Az egyik alapvető invariáns tulajdonság az ún. tiszta késleltetés vagy holtidő, amely adódhat a technológia szállítási idejéből, a mért jel terjedési sebességéből vagy pedig egy bonyolult mérés kiértékelési idejéből. A holtidő invariáns folyamat tulajdonság, amit nem tudunk kikompenzálni, csak hatását csökkenteni vagyunk képesek. Itt az alapvető probléma, hogy a folyamat a parancsra (utasításra) a holtidő alatt (innét adódik az elnevezés) semmilyen választ nem mutat (lásd a 4. ábrát), a szabályozás helyes működésekor meg kell várnunk, amíg az első válasz megjelenik, tehát



4. és 5. ábra • Holtidős folyamat és nem-minimumfázisú folyamat válasza

le kell lassítanunk és óvatosabbá kell tennünk a zárt rendszerünket. Ezt is mindenki tapasztalta már, ha zuhanyozáskor a melegvízes csap elég messze van a zuhanyrózsától, hiszen óvatos csavargatással tudjuk csak beállítani a kívánt hőmérsékletet. Számos holtidős folyamatot ismerünk, és kajánkodva megemlítem, hogy a felsőoktatás is az: a képzési idő függvényében néhány év múlva látjuk csak meg az eredményt, ezért a rendszer- és szabályozástechnikus általában menekül a lángoló szemű reformerektől, akik évente szeretnének reformot végrehajtani, mert tudják, hogy ez a legbiztosabb módja a labilitás („káosz?”) bevezetésének. Első szabályozástechnika-professzorem, az Akadémia akkori alelnöke, Csáki Frigyes lemondott a rektorságról, amikor olyan „reformot” akartak rákényszeríteni, ami szöges ellentétben volt a fenti ismereteivel. De említhetném az állattenyésztést is, ahol a vemhességi idő jónéhány hónapban mérhető, nem kérdéses, hogy az eredményt csak ezután láthatjuk, mégis előfordult számtalan alkalommal havi, negyedéves ösztönzési stratégia, ami szintén ellentmond az elméletnek. A frekvenciafogalomban jártas tudományágak számára azt mondhatjuk, hogy a holtidőnek megfelelő frekvenciánál magasabb tarto-

mányokban a szabályozás nem tud működni! A szabályozás minősége nem tőlünk, hanem a folyamattól függ. A szabályozó algoritmus meghatározása alapos szakértelmet igényel.



A holtidő nagymértékű megnövekedése végül lehetetlenné teszi a közvetlen zárt szabályozási kör alkalmazását. Ez

a helyzet például egy marsjáró robot esetében, ahol a távirányítás gyakorlatilag már nem alkalmazható. (A Hold esetében bizonyos minőségromlás elviselésével ez még elképzelhető, lásd a vonatkozó történelmi lépéseket.) Ilyenkor nincs más mód, mint lényegesen magasabb intelligenciával kell az önműködő berendezést ellátni és helyi döntésre bízni a szabályozást.

A folyamatok egy másik osztályát nem-minimumfázisú folyamatoknak hívjuk, s ezek szintén fontos invariáns tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezt a bonyolult nevet nagyon könnyen tudjuk szemléltetni, ha ábrázoljuk egy ilyen folyamat választ egy ugrásalakú parancsra.

Ez viccesen egy illetlen, gonosz viselkedés, mert a folyamat válasza elindul egy irányba

(nem az utasítás által megkövetelt irányba!), majd meggondolja magát és a változás irányát megváltoztatva a másik irányban éri el állandósult állapotát (s. *ábra*). Ha a beavatkozó ember vagy az automatikus berendezés nem elég „türelmes”, akkor a beavatkozásának katasztrofális hatása lehet: a labilitás. (Sajnos ez volt az egyik tényező Csernobil esetében, ahol a változás időállandója, dinamikája elég lassú volt ahhoz, hogy kikapcsolt automatika esetében a kísérletező embert tökéletesen megzavarja.) Érezhető a hasonlóság a holtidős folyamatok problémájához, mert itt is meg kell várni azt az időt, amíg eldönthetjük, hogy eltelt-e már a tranzien folyamat zavaró különleges viselkedésű kezdeti szakasza. (Holtidős folyamatokat nem-minimumfázisú folyamatok modelljével szokták közelíteni. Az elektronikában járatos szakemberek jól ismerik a mindent áteresztő szűrőket, amelyek szintén ebbe a modellosztályba tartoznak.) Létező technológiáinkban nem mondhatjuk, hogy ezen típusú folyamatok vannak többségben, de számuk nem elhanyagolható (durva becslés szerint talán kevesebb, mint 10 %), és itt is a szabályozás minősége nem tőlünk, a tervezőtől, a szakembertől függ, hanem a folyamattól. A szabályozó meghatározása itt a nehéz feladatok közé tartozik

Lelkesen szoktuk emlegetni, hogy a digitális számítógépek elterjedésével az úgynevezett alkalmazási küszöbszint olyan mértékben csökkent, hogy alig-alig létezik olyan irányítási algoritmus, amelyet ne tudnánk megvalósítani. Ezek az ún. mintavételes rendszerek a valóságban folytonos idejű folyamatokat diszkrét idejű modellekkel helyettesítik. Az ilyen modelleknél viszont megfordul a helyzet, mert többségük nem-minimumfázisú tulajdonságokkal rendelkezik (durva becslés: több mint 90 %). Ezért a számítógépes irá-

nyítás szabályozóinak tervezéséhez is az elmélet igen alapos ismerete szükséges.

Érdemes megemlíteni, hogy az optimális szabályozók valamilyen formában mindig a folyamat dinamikus viselkedésének az inverzét próbálják alkalmazni. Sajnos az említett holtidős és nem-minimumfázisú folyamatok inverze nem realizálható, illetve labilis. Érdekes matematikai probléma, a legközelebbi inverz megkeresése adja az optimális szabályozót a megvalósíthatóság határai között.

Összetett problémák



A fenti problémák természetesen fokozottan jelentkeznek, ha az irányítás nem egy, hanem több változó szabályozását tűzi ki célul (többváltozós rendszerek). Egy népszerűsítő cikk keretében nem is nagyon van mód szemléltetni ezt a hihetetlen ugrást, ami a probléma dimenziójának és a tervezés paramétereinek megnövekedésével következik be. Itt csak arra utalunk, hogy néhány tucat beavatkozó lehetőség és ugyanennyi szabályozandó változó esetében emberi képességekkel még azt sem tudnánk eldönteni, hogy adott beavatkozással egy előírt tulajdonság befolyásolható-e. Nagyipari folyamatoknál, például olajfinomítóban a szabályozásba bevont változók száma több száz is lehet. E vizsgálat megalapozásában a magyar származású *Kálmán Rudolf*, Akadémiánk tiszteleti tagja, alapvető és úttörő tevékenységet végzett az irányíthatóság és megfigyelhetőség elméletének kidolgozásával. Itt az eddigi skalár változók szerepét vektorok, a paramétereiket pedig mátrixok veszik át. Még lineáris rendszerek esetében sem lehetséges mély matematikai ismeretek nélkül tárgyalni a különböző többváltozós folyamat

modellek és a lehetséges irányítási megoldások származtatását, kidolgozását.

Nem volt célszerű eddig emlegetni, hogy a röviden áttekintett megoldások a folyamatok lineáris közelítését használják a szabályozók tervezésében, a valóságos rendszerek viszont általában bonyolult nemlineáris tulajdonságokkal rendelkeznek, így az eddigiek mindig csak egy adott tartományban használhatóak, ahol a lineáris közelítés elfogadható. A nemlineáris rendszerek sokfélesége miatt nem könnyű általános elméletet alkotni, de ez a terület is egyre több valódi alkalmazásig jutott el. Akinek autója benzindagolását a fedélzeti számítógép irányítja, az biztos lehet benne, hogy valódi nemlineáris szabályozó oldja meg az igen hasznos és nélkülözhetetlen feladatot. A szükséges üzemanyag mennyisége ugyanis olyan bonyolult nemlineáris felületen keresztül függ az üzemi paraméterektől, amit gyakorlatilag nem lehet és nem érdemes linearizálni. Nemlineáris rendszerek modelljei és irányítási algoritmusai szintén magas szintű matematikai ismereteket igényelnek.

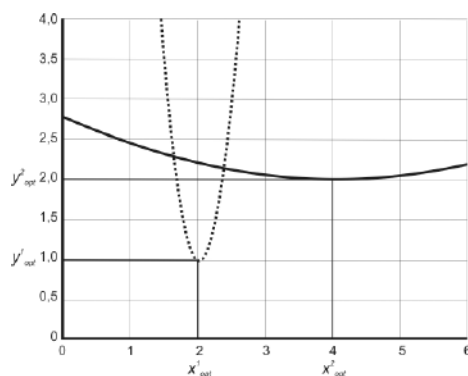


A szabályozók tervezése általában megköveteli a folyamat egy elfogadható pontosságú modelljének az ismeretét. Ezt a modellt sokféleképpen megkaphatjuk, és elképzelhető olyan módszer is, amely a folyamat be- és ki-menőjelét figyelve mindig kiszámít (becsül, identifikál stb.) egy modellt, amelyet a soron következő szabályozástervezési lépés felhasznál. Ily módon ún. tanuló, adaptív irányítást hozhatunk létre. A téma nagyon divatos volt az 1970-es és 80-as években, majd bekövetkezett néhány alapvető felismerés. Antagonisztikus ellentmondás van a tanulás információ-

igénye (azt kívánja, hogy a szabályozási körjelei minél erőteljesebben változzanak) és a szabályozás szokásos követelményei (gyors tranzien folyamatok után nyugodt viselkedés, nem változó jelek) között. A tanuló szabályozásnak az lenne az igazi célja, ha a folyamat paraméterei folyamatosan változnak, akkor ezen változás megtanulásával mindig az optimális szabályozót tudnánk realizálni. Itt egy következő antagonisztikus ellentmondás. Ha tanulni akarjuk az új paramétereket, akkor bizony a régiakat el kell felejteni. Ezt a tulajdonságot a felejtési képességek hangolásával lehet biztosítani. Ha túl gyorsan felejtünk, akkor gyors paraméterváltozást is meg tud az algoritmus tanulni, de a kockázat nagy: ha nem jön új információ, akkor elfelejti a megtanult modellt, és a tervezett szabályozó használhatatlan lesz. Ha túl lassan felejtünk, akkor pedig nem tudja követni a folyamat változásait az adaptív modell. Ezért a tanuló algoritmust úgy kell elkészíteni, hogy csak új információ esetében felejtse, ha ez nincs, akkor őrizze meg eddigi tudását. A szavakban elmondott képességeket borzasztóan nehéz biztosítani egy matematikailag is megalapozott módszerrel. Ezeket az ellentmondásos követelményeket, valamint igen igényes elméleti háttérrel az ipari gyakorlat nem tudta teljesen befogadni: „Nem tudunk minden adaptív szabályozó mellé egy táltost állítani, aki szükség esetén megmondja, hogy mi a probléma” – vélekedtek. Végezetül bizonyos technológiáknál azért kialakult az ipari alkalmazhatóság feltétele is. Ezek az úgynevezett önbeállító kompakt szabályozók, amelyekre megnyomunk egy gombot, ezután a folyamat előírt gerjesztését létrehozva lezajlik egy tanulási folyamat, és a szabályozó beállítja saját optimális paramétereit. Szó sincs folyamatos tanuló, adaptív szabályozásról, mert

erre az önhangolásra rendszerint csak ritkán van szükség.

Érdemes még szólnunk az optimalitás fogalmának alakulásáról az elmúlt évtizedekben. Optimalitás alatt rendszerint valamilyen számszerű minőségi jellemző minimumát szokták elméleti, matematikai eszközökkel meghatározni. Ezt a minimumot biztosító szabályozót hívjuk optimálisnak. A korábbi évtizedekben hihetetlen mennyiségű elméleti munka folyt az ilyen optimumok kiszámítására, a szabályozók optimalizálására. A tanulási képességekhez hasonlóan végül is a gyakorlati igények alapvetően átalakították a „hasznos” optimalitás fogalmát. A gyakorlatban ugyanis többet ér az $(x_{opt}^2, y_{opt}^2) = (4, 2)$ optimum, lásd a 6. ábrát, ami nagyobb, mint az $(x_{opt}^1, y_{opt}^1) = (2, 1)$ optimum. A 2-es optimum környezetében viszont a görbe (több dimenzióban egy felület) lényegesen laposabb, érzékletlenebb: szaknyelven azt mondjuk, hogy *robustusabb*. A gyakorlati feladatok egy igen kis százalékában fontos csak valamilyen minőségi jellemző valódi optima, ami sokszor jól láthatóan igen érzékeny, mert már igen kis változás hatására messze juthatunk az optimális minőségi jellemzőtől. Többre értékelődik egy rosszabb optimum, amely



6. ábra • Különböző optimumok

viszont igen széles tartományban tartható és nagymértékben érzéketlen a feltételek változására. Az optimalitás kritériumaként a modern irányításelmélet jelek és operátorok normafogalmait használja.

Az optimalitás átalakulása a sokváltozós összetett szabályozások struktúrájára is fennáll. A rendszerváltás hónapjaiban egy akadémiai előadáson megjegyeztem, hogy a rendszer- és irányításelmélet szerint az optimális irányítás a központi irányítás. Nagy csönd támadt, majd az ijedt szemekhez szólva megjegyeztem, hogy ez csak akkor igaz, ha valamennyi információ rendelkezésre áll a központban. Ez viszont gyakorlatilag soha nem fordul elő. Erről feledkeztek meg korábbi, nem sikerült politikai rendszerek irányítói (bár mindent megtettek, hogy a központban legyen az információ). Lehet, hogy elméletileg nem optimális, de sokkal megbízhatóbb, robustusabb az elosztott irányítás, ahol a bizonyos célszerű centrumok közelében csomósodó információk központokra épül az irányítás. A centrumok között megfelelő koordinációra, együttműködésre van szükség. Ez a demokrácia! Ugye milyen érdekes a társadalomtudományi hasonlatosság? Persze ne felejtjük el, hogy emberi, társadalmi rendszereink bonyolultsága lényegesen összetettebb, mint a technikai rendszereké, de az analógia szembetűnő. (A közönség fellélegzett!)

Következtetések

Az irányítási technológiák tehát rejtettek, a kényelemhez szokott felhasználók többsége nem is tud ezek működéséről. Ezért a rejtett jellegért a szakma sokszor panaszkodik, mert a szokásosnál több energiát igényel döntést hozók, kutatásialap-kezelők stb. meggyőzése a terület fontosságáról. Mélyebben gondolkodók kedvelik emlegetni a C^3 vagy CCC eset-

leg a $3 \times C$ technológiákat, ahol a C -k jelentése angol elnevezéseken alapul; a Control (irányítás), Computation (számítás) és Communication (kommunikáció) szavak kezdőbetűit használják. Az adott terület szereti az első szóként a sajátját használni. Korszerű technikai rendszerek valóban igen sokszor e három rész adott magasszintű kombinációját realizálják, ezért rendkívül nehéz megmondani, hogy melyik oldal a bonyolultabb, a nehezebben megvalósítható, mert ez csak az adott feladatnál dől el. A számítógépes, digitális technika mindhárom területet átszövi, ezért sokszor hozzátesszük az I -t is, ami a programozott intelligenciát jelenti.

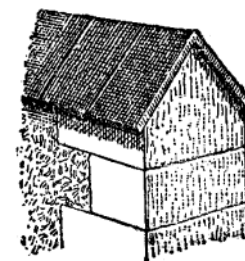
A legkorszerűbb irányítási rendszerekben az irányítás célját igen bonyolult algoritmusok határozzák meg, és szó sincs már a mért és előírt értékek klasszikus összehasonlításáról. Egy gépjárművet az úton tartó automatikától elvárjuk, hogy szélsőséges időjárási viszonyok



között is felismerje az út nyomvonalát, és a vezető ideiglenes kiesése esetében is biztonságos időre

átvegye a kormányzást. Az autópályán érzékelje a forgalmi viszonyokat, és elől-hátul biztonságos távolságot tartva olyan forgalmi formációban tartsa járművünket automatikusan, amely egyidejűleg optimalizálja a fogyasztási, követési, biztonsági és pályaelhagyási feltételeket is.

Az irányítás és szabályozás technológiája továbbra is rejtve marad, sőt a módszerek fejlődésével egyre inkább észrevétlen lesz a felhasználó előtt. Ezt maguk az emberek igénylik: nem szeretnek belegondolni, hogy mi történhet, ha az automatika leáll. Ezért felelősségünk nagy, a jövő kényelme, biztonsága, lehetősége, élhető életünk minősége rajtunk is múlik. Hiába: „Controllare” necesse est.



Tudós fórum

ÁLLÁSFOGLALÁS A DARWINI EVOLÚCIÓS ELMÉLET VÉDELMEBEN

A Magyar Tudományos Akadémia – hasonlóan 67 ország tudományos akadémiáihoz, köztük az elsők közt megszólaló Royal Society-hez – elhatárolódik azoktól a tudományon kívüli elképzelésektől (pl. *Intelligent Design*), amelyek a darwinizmus tudományosan megalapozott állításait támadják, eltorzítják, illetve áltudományos érvelésekkel kritizálják.

A nézetkülönbség fő forrása véleményünk szerint a vallásos hit és a tudomány természetének félreértéséből, bizonyos tudományos alapfogalmak (pl. mi az evolúció) eltérő meghatározásából adódik. Az evolúció tanulmányozása biológiai megfigyeléseken, méréseken és következtetéseken alapuló tudomány (amelynek egyes állításai bizonyíthatóak és cáfolhatóak), míg a kreacionizmus (így a teljesen hipotetikus *Intelligent Design* is) dogmán és feltételezéseken alapuló elmélet, amelyek nem összevethető, szembeállítható fogalmak.

Meggyőződésünk, hogy a vallásos hit (így a kreacionizmus is) sem nem igazolhatja, sem nem cáfolhatja az evolúció tudományos elméletét, mint ahogy a tudományok sem foglalkozhatnak hitbéli kérdésekkel. A vita a Magyar Tudományos Akadémián is szóba került; részletes anyaga a *Magyar Tudomány* című folyóiratban is megjelent (MT 2006/9. sz.). A darwini evolúciós elmélet – ahogy a tudományokban a fejlődést figyelembe véve ez megszokott – nem teljesen lezárt volta ellenére, tudományosan megalapozottnak tekinthető és kellően leírja a fajok keletkezését és átalakulását.

Budapest, 2008. február 26.

*a Magyar Tudományos Akadémia
Elnöksége*

ÁLLÁSFOGLALÁS

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

Biológiai Tudományok Osztálya • Fizikai Tudományok Osztálya
Földtudományok Osztálya • Matematikai Tudományok Osztálya
Műszaki Tudományok Osztálya

A Magyar Tudományos Akadémia fent nevezett öt tudományos osztálya álláspontja a természettudományos oktatásról

Az új tantervi javaslat lehetővé teszi a természettudományos tárgyak óraszámának csökkentését. Az MTA Biológiai Tudományok Osztálya, az MTA Fizikai Tudományok Osztálya, az MTA Földtudományok Osztálya és az MTA Matematikai Tudományok Osztálya, valamint az MTA Műszaki Tudományok Osztálya nem ért egyet ezzel a javaslattal.

Az emberi kultúra és műveltség szerves részét képezik a természettudományok és a matematika, de ugyanakkor nélkülözhetetlenek az egyre bonyolultabb világban való tájékozódáshoz is. A gyakran népszavazásig vitt környezeti kérdések megértésétől az áltudományokkal, babonákkal, hiedelmekkel szembeni felvérteztségig gyakorlati szempontból is fontos tudásról van szó. A természettudományos ismeretek oktatásának növekvő fontosságát a versenyképesség szempontjából a fejlett országok már felismerték, és lépéseket tettek a színvonal emelésére (USA, Anglia, Németország). Magyarországon a műszaki, természettudományos végzettséggel rendelkezők aránya ijesztően alacsony, ami immár gátja a tudásalapú társadalom megteremtésé-

nek, az ország dinamikus fejlődésének, annak, hogy a nemzetközi munkamegosztásban a magasabb hozzáadott értékű munka felé tolódjon el az arány. Ezen nem lehet csak a felsőoktatási felvételi arányokkal segíteni, a közoktatással és a tanárképzéssel kell kezdeni.

A Magyar Tudományos Akadémia már korábban felhívta a döntéshozók figyelmét a természettudományos tárgyak fontosságára, a jelenlegi tantervi módosítási javaslat – sajnos – ezzel ellenkező irányba mutat.

Az öt tudományos osztály kéri az oktatásért felelős testületeket, hogy tegyenek hathatós, lényegi javulást eredményező lépéseket a természettudományos ismeretek szélesebb körben való elterjesztésére, az ilyen tantárgyak magasabb színvonalú oktatása érdekében. Ehhez a minimális feltétel, hogy ne adjanak jelzéseket a természettudományos tárgyak óraszámának csökkentése irányába. Alapvető javulást hozna, ha egy választott természettudományos tárgy kötelező érettségi tárgy lenne.

Az osztályokon megvitattuk a fenti kérdéskört szélesebb összefüggéseiben is. Megfontolandónak tartjuk a középiskolákban a reál és humán specializáció bevezetését. A reál középiskolai képzésben emelt órásszámmal szerepelnének a természettudományos tár-

gyak, és az érettségi vizsgán diszciplináris tárgyválasztás lenne, míg a humán képzésben az érettségi vizsga természettudományos tárgyválasztása összevont természetismereti tárgy keretében valósulna meg.

Levelünk írásával egy időben tudomásunkra jutott, hogy az Országgyűlés Oktatásügyi Bizottsága javaslatot fogadott el, ami kötelezővé tenné egy természettudományos tárgy választását az érettségi vizsgán. Üdvözöljük e

javaslatot, és reméljük, hogy ez egy elmozdulás kezdetét jelzi a természettudományos ismeretek szélesebb körű és magasabb színvonalú elterjesztése irányában.

Levelünket eljuttatjuk a *Fizikai Szemle* és a *Magyar Tudomány* lapokhoz is.

Budapest, 2008. február 28.

tisztelettel

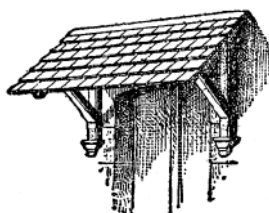
Damjanovich Sándor
a Biológiai Tudományok
Osztályának elnöke

Horváth Zalán
a Fizikai Tudományok
Osztályának elnöke

Ádám József
a Földtudományok
Osztályának elnöke

Szász Domokos
a Matematikai Tudományok
Osztályának elnöke

Gyulai József
a Műszaki Tudományok
Osztályának elnöke



SZEGEDI SZÉCHENYI-DÍJAS AKADÉMIKUSOK FELHÍVÁSA A SZÁZ LEGGAZDAGABB MAGYARHOZ

Élénk érdeklődést keltett a közvéleményben a száz leggazdagabb magyar rangsorának közzététele. Csak örömeinkre szolgálhat az a tudat, hogy élnek közöttünk kiváló, jó üzleti érzékkel megáldott, nagy munkabírási honfitársaink, és hogy a sokat hangoztatott, híres kreativitásunknak mégiscsak lehet valami alapja. Az említett tulajdonságokra azonban az életnek egy másik területén is szükség van: ez pedig a tudomány. A kutatás megszállottai is zömmel az átlagot meghaladó alkotóképességgel és szorgalommal megáldott emberek, akiknek teljesítményében óriási különbségek vannak. Az ország vezetőinek arra kellene törekedniük, hogy mindkét kiemelkedő csoport számára biztosítsák a kibontakozásukhoz szükséges feltételeket. A vállalkozóknak azonban arra is adottak a lehetőségek, hogy a másik „kreatív” réteg munkakörülményeit javítsák, kutatásukat támogassák. Ez részükről nemcsak egy önzetlen cselekedet lenne, hiszen a létrejövő szellemi termékek végső soron a gazdaság növekedését is szolgálnák. Hazánkban a természettudományok

területén a legnagyobb gondot ma már nem az eszközök, hanem a kutatók hiánya, illetményük előteremtése jelenti. Az EU-országok népességéhez viszonyítva Magyarországon van a legkevesebb kutató. Jelentős minőségi változást eredményezne, ha a száz leggazdagabb vállalkozó személyenként öt-tíz ösztöndíjat – nevezzük **Szent-Györgyi-ösztöndíjnak** – létesítené. Egy doktorandusz illetménye évi viszonylatban ~1,2 milliót, egy poszt-doktoranduszé pedig ~hárommillió forintot tesz ki. A két, munkájában sikeres csoport közötti kapcsolat példamutató nemzetépítő formája lehetne, ha a száz leggazdagabb vállalkozó elsősorban az objektív felmérések, a nemzetközi visszajelzések szerint száz legsikeresebb tudós honfitársának kutatóhelyét erősítené a javasolt ösztöndíjakkal.

*Dobozy Attila, Dudits Dénes,
Keszthelyi Lajos, Papp Gyula,
Solymosi Frigyes, Télegdy Gyula,
Vigh László*
szegedi Széchenyi-díjas akadémikusok

DÍJAK, KITÜNTETÉSEK

A MAGYAR KÖZTÁRSASÁG ELNÖKE ÁLTAL NEMZETI
ÜNNEPÜNK, MÁRCIUS 15-E, AZ 1848–1849-ES FORRADALOM
ÉS SZABADSÁGHARC KEZDETÉNEK,
A MODERN PARLAMENTÁRIS MAGYARORSZÁG
MEGSZÜLETÉSÉNEK NAPJA ALKALMÁBÓL
ADOMÁNYOZOTT DÍJAK ÉS KITÜNTETÉSEK

Széchenyi-nagydíj

Lovász László matematikus, az MTA tagja, az ELTE Matematikai Intézetének tanára

Széchenyi-díj

dr. Bónis Ferenc, az MTA doktora, zenetörténész

dr. Gergely Pál, az MTA levelező tagja, a Debreceni Egyetem
Orvos- és Egészségtudományi Centrum tanára

dr. Gerő András történész, az MTA doktora, az ELTE tanára

dr. Gerszti Teréz művészettörténész, a Szépművészeti Múzeum főmuzeológusa

dr. Hetényi Magdolna geokémikus, az MTA rendes tagja,
a Szegedi Tudományegyetem tanára

Horváth Adrián építőmérnök, a FŐMTERV Zrt. igazgatója

dr. Kálmán Erika vegyészmérnök, az MTA doktora, az MTA Kémiai Kutatóközpont
intézeti igazgatója, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem tanára

dr. Kenyeres Zoltán irodalomtörténész, az ELTE tanára

dr. Kiefer Ferenc nyelvész, az MTA rendes tagja, az MTA Nyelvtudományi Intézetének
ny. kutatóprofesszora

dr. Kovács László, az MTA rendes tagja, a Debreceni Egyetem
Orvos és Egészségtudományi Centrum tanára

dr. Nagy Ferenc, a biológiai tudomány doktora, az MTA Szegedi Biológiai Központ
Növénybiológiai Intézet igazgatóhelyettese

dr. Schipp Ferenc, a matematikai tudomány doktora, az ELTE tanára

dr. Schuler Dezső, az orvostudomány doktora, a Semmelweis Egyetem tanára

dr. Szentés Tamás közgazdász, az MTA rendes tagja, a Budapesti Corvinus Egyetem tanára

dr. Szirmai Viktória szociológus, az MTA doktora, a Szent István Egyetem tanára

dr. Vámos Tibor villamosmérnök, az MTA rendes tagja, az MTA Számítástechnikai és
Automatizálási Kutatóintézet tudományos tanácsadója

posztumusz Széchenyi-díj

dr. Csörgő Sándor matematikus, az MTA rendes tagja, a Szegedi Tudományegyetem tanára

A magyar Köztársasági Érdemrend középkeresztje a csillaggal (polgári tagozat)

dr. Erdős Tibor közgazdász, az MTA rendes tagja, nyugalmazott egyetemi tanár

dr. Kende Péter politológus, szociológus, az MTA külső tagja

dr. Ormos Mária történész, az MTA rendes tagja, ny. egyetemi tanár

A magyar Köztársasági Érdemrend középkeresztje (polgári tagozat)

dr. Berényi Dénes az MTA rendes tagja,

az MTA Atommagkutató Intézet professor emeritusa

dr. Cser László, az MTA doktora, az ELTE tanára

dr. Pataki Ferenc, az MTA rendes tagja, az MTA Pszichológiai Intézet kutatóprofesszora

dr. Repa Imre orvos, a kaposvári Kaposi Mór Oktató Kórház főigazgatója,
a Kaposvári Egyetem rektorhelyettese

dr. Ürge-Vorsatz Diána, a Közép-Európai Egyetem tanára

AZ MTA ELNÖKÉNEK ELŐTERJESZTÉSÉRE A MAGYAR
KÖZTÁRSASÁG ELNÖKE MÁRCIUS 15-E ALKALMÁBÓL
A KÖVETKEZŐ KITÜNTETÉSEKET ADOMÁNYOZTA:

Magyar Köztársasági Érdemrend Tisztikereszt

Augusztinovics Mária külső munkatárs, MTA Közgazdaságtudományi Intézet

Bársony István igazgató, MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Magyar Köztársasági Érdemrend Lovagkereszt

Murányi Lajos osztályvezető, MTA Könyvtára

Pannonhalmi Kálmán főosztályvezető, MTA Titkársága

Párdutz Árpád tudományos tanácsadó,

MTA Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézet

Szelényi Judit tudományos tanácsadó, MTA Kísérleti Orvostudományi Intézet

Szépvolgyi János igazgató, MTA Kémiai Kutatóközpont Anyag- és Környezetkémiai Int.

Magyar Köztársasági Érdemkereszt Ezüst Érdemkereszt

Dobiné Nagy Ildikó gazdasági igazgatóhelyettes, MTA Kutatásszervezési Intézet

Horváth Erzsébet üdülővezető, Mátraházai Akadémiai Tudós Üdülő

Szilasi Horváth István ügyvezető igazgató, MTA Műszer- és Méréstechnikai
Szolgáltató és Kereskedelmi Kft.

Tóth Ferenc főosztályvezető-helyettes, MTA Titkársága

A kitüntetéseket Vizi E. Szilveszter, az MTA elnöke adta át.

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA FŐTTKÁRA
A TUDOMÁNYOS ÉLET TERÜLETÉN DOLGOZÓ FIATAL
KUTATÓK EREDMÉNYEINEK ELISMERÉSÉRE LÉTREHOZOTT
AKADÉMIAI IFJÚSÁGI DÍJBAN RÉSZESÍTETTE:

Boóc Ádámot, az MTA Jogtudományi Intézet tudományos munkatársát
Győri Róbertet, az MTA Regionális Kutatások Központja tudományos munkatársát
Hegedűs Bélát, az MTA Irodalomtudományi Intézet tudományos munkatársát
Józsa Krisztiánt, az MTA Szegedi Tudományegyetem Képességekutató Kutatócsoport egyetemi docensét
Neumann Tibort, az MTA - Szegedi Tudományegyetem – MOL Magyar Medievisztikai Kutatócsoport tudományos segédmunkatársát
Turai Tündét, az MTA Néprajzi Kutatóintézet akadémiai ifjúsági ösztöndíjasát
Elekes Márton, az MTA Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet tudományos munkatársát
Pap Gyulát, az MTA-ELTE Egerváry Jenő Kombinatorikus Optimalizálási Kutatócsoport tudományos segédmunkatársát
Röst Gergelyt, az MTA Szegedi Tudományegyetem Analízis és Sztochasztika Kutatócsoport tudományos munkatársát
Bánóczy Zoltánt, az MTA-ELTE Peptidkémiai Kutatócsoport tudományos segédmunkatársát
Héja Lászlót, az MTA Kémiai Kutatóközpont Biomolekuláris Kémiai Intézet tudományos segédmunkatársát
Tárkányi Gábort, az MTA Kémiai Kutatóközpont Szerkezeti Kémiai Intézet tudományos főmunkatársát
Barnaföldi Gergely Gábort, az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet tudományos munkatársát
Dombi Pétert, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet tudományos munkatársát
Kiss Tamást, az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet tudományos munkatársát
Lazarovits Bencét, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet tudományos munkatársát
Arányi Tamást, az MTA Szegedi Biológiai Központ Enzimológiai Intézet tudományos főmunkatársát
Dallos Attilát, az MTA Szegedi Tudományegyetem Dermatológiai Kutatócsoport tudományos munkatársát
Györffy Balázst, az MTA–Semmelweis Egyetem Gyermekgyógyászati és Nephrológiai Kutatócsoport tudományos főmunkatársát

Kovári Júliát, az MTA Szegedi Biológiai Központ Enzimológiai Intézet tudományos segédmunkatársát

Tóth Juditot, az intézet posztdoktorát és

Varga Balázst, az intézet tudományos segédmunkatársát

Nyíri Gábort, az MTA Kísérleti Orvostudományi Kutatóintézet tudományos főmunkatársát

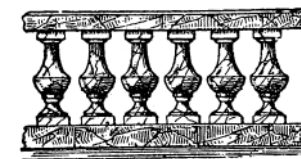
Orci Kirill Márkot, az MTA Magyar Természettudományi Múzeum Állatökológiai Kutatócsoport tudományos főmunkatársát

Szabó-Fodor Juditot, az MTA Kaposvári Egyetem Állattenyésztési és Állathigiéniai Kutatócsoport tudományos segédmunkatársát

Szirmai Orsolyát, az MTA Szent István Egyetem Növényökológiai Kutatócsoport tudományos segédmunkatársát

Ughy Bettinát, az MTA Szegedi Biológiai Központ Növénybiológiai Intézet tudományos munkatársát

A kitüntetésekhez gratulálunk
a szerkesztőség



Megemlékezés

2008. február 4-én elhunyt Gergely János kutatóprofesszor, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja, az Eötvös Loránd Tudományegyetem emeritus professzora. Halálával egy kivételes embert és tudóst veszítettünk el, akinek bölcs tanácsai, mindig gondolkodásra készítő megjegyzései, a vele való beszélgetések nagyon sokunk számára szinte pótolhatatlanul hiányoznak ezentúl.



GERGELY JÁNOS

1925 – 2008

Gergely János 1925. december 13-án született Karcagon. 1943-ban érettségizett a Karcagi Református Nagykun Gimnáziumban; egyetemi felvételére a numerus clausus és a háborús események miatt azonban csak 1945-ben kerülhetett sor. Ekkor lett a Debreceni Orvostudományi Egyetem hallgatója, majd harmadéves korától a budapesti orvostudományi egyetemen folytatta tanulmányait. A diploma megszerzése után a III. számú Belgyógyászati Klinikán Gömöri Pál professzor aspiránsaként vesebetegséggel járó vérfehérjevesztést követő folyamatokat vizsgált; e témából írta kandidátusi értekezését is. Ezek az évek döntőek voltak későbbi karrierje szempontjából, mivel a vérfehérjék vizsgálata terelte a figyelmét a fehérvérűség egy formájára, melynek során a kórosan burjánzó plazmasejtek termékei, az immunoglobulinok is nagy mennyiségben megszaporodnak. Ezekben az években németország-

gi tanulmányútja során, a Tübingeni Egyetemen végzett kutatásai kapcsán ismerkedett meg a modern immunológiai módszerekkel, és tovább mélyült érdeklődése az immunfehérjék szerkezetére és működésére irányába.

1963-ban Hollán Zsuzsa felkérésére létrehozta az Országos Hematológiai és Vértranszfúziós Intézetben az immunkémiai laboratóriumot. Az irányításával meginduló kutatásokból születtek azok az első,

a *Nature*-ben is megjelenő jelentős eredményei, melyek azt bizonyították, hogy az ellenanyag-molekulák nehéz és könnyű láncainak konformációja befolyásolja a láncok kapcsolódását. E munka során került kapcsolatba a Birmingham-i és a San Francisco-i Egyetem munkatársaival, D. Stanworth és H. Fudenberg professzorral is. Az *orvostudomány doktora* címet 1967-ben nyerte el.

1973-ban ismét jelentős fordulóponthoz érkezett pályáján: megbízást kapott az ELTE akkori rektorától, Ádám György professzortól, hogy szervezze meg és irányítsa az ország első és évtizedekig egyetlen önálló immunológiai tanszékét. Sok akkori hallgató számára meghatározóan fontos volt és nagy élményt jelentett Gergely János immunológiakurzus. A magas színvonalú oktatás egyik feltételének tekintette, hogy a hallgatók számára magyar nyelvű tankönyv álljon rendelkezésre. A kor-

szzerű immunológiai oktatás itthoni bevezetése mellett Gergely János nevéhez fűződik az első magyar nyelvű immunbiológiai tankönyv megírása is; a mű 1979-ben jelent meg. Az általa létrehozott tanszéken tovább folytatódott a nemzetközileg is elismert színvonalú kutatómunka; a korábbi témák kiegészültek az ellenanyag-, valamint a komplementkötő receptorok vizsgálatával. Ezt követően a B-sejtek aktiválódása, a jelátviteli utak vizsgálata is fontos része lett a Gergely János által vezetett kutatócsoport munkájának.

1993-tól az ELTE emeritus és az MTA kutatóprofesszoraként továbbra is rendkívül aktív maradt. Fáradhatatlanul szerkesztette az újabb egyetemi tankönyvet, ami a tanszéki munkatársakkal való közös munka eredményeként 1998-ban jelent meg. A kutatás területén is újabb és újabb érdekes szempontokat vetett fel, és jelentős pályázatokat nyert el. 1992–96 között Peter Dukor professzor meghívására három munkatársával a bécsi Vienna International Research Cooperation Centerben irányította a csoport kutatómunkáját. Vizsgálatai középpontjába az ellenanyag-termelő B-sejtek FcγRIIb közvetített gátlásának tanulmányozása került. Molekuláris biológiai módszerek alkalmazásával kimutatták, hogy a B-sejtek aktiválása az antigénfelismerő receptorkomplex (BCR) közvetítésével jellegzetes változásokat indít meg a sejtaktivációt gátló FcγRIIb-ben. Az aktiváció hatására az FcγR foszforilálódik, és megváltozik az endocitózist közvetítő, ill. azt közvetíteni nem tudó receptor izoformák kifejeződésének aránya. Azonosították az FcγRIIb-közvetített gátló folyamat kiváltásában fontos jelátvivő molekulákat (protein tirozin kinázokat, adapter molekulákat, foszfatázokat).

Gergely János felbecsülhetetlen érdeme, hogy számos nemzetközi konferenciát szerve-

zett itthon a 70–80-as években, amikor nem volt könnyű eljutni külföldi rendezvényekre. Kiváló megérzése volt a 70-es évek elején egy olyan konferenciasorozat elindítása, mely a sejtekben lezajló jelátviteli folyamatokkal foglalkozott elsősorban. Abban az időben nemhogy itthon, de külföldön is csak nagyon kevesen gondolták, hogy ez a folyamat ilyen központi szerepűvé válik később, és az immunfolyamatok vizsgálatának jelentős részére kiterjed. Ez az előrelátása olyannyira fontos és maradandó, hogy 2007-ben – Gergely János aktív részvételével – már a 14. Signal-konferenciára került sor Magyarországon. A korábbi években nagy segítséget jelentett a hazai immunológusok számára, hogy Magyarországra hozott kiemelkedő tudósokat, akikkel így mód nyílt az ismerkedésre, szakmai beszélgetésekre. Ennek hatására számos külföldi meghívás, tartós közös kutatómunka alakult ki egyebek között Denis Stanworthszel és Roy Jefferisszel (Birminghami Egyetem), Eva Klein-nel (Stockholm, Karolinska Intézet), Harvey Coltannel (Boston, Harvard Egyetem), Howard Dicklerrel (Bethesda, NIH), Michael Selával és Israel Pechttel (Rehovot, Weizmann Intézet), Fritz Melchersszel (Bázel Immunológiai Intézet).

Sokrétű volt közéleti tevékenysége is – hazai és nemzetközi téren egyaránt. 1982-ben az MTA levelező, majd 1990-ben rendes tagja lett. 1990 és 1996 között az MTA Biológiai Tudományok Osztályának elnöke, majd tíz éven át az MTA Elnökség tagja volt. 1998-ban felkérte az Akadémia a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj Kuratórium elnöki tisztjére, amit 2007-ig látott el. A hazai immunológia meghatározó alakja volt évtizedeken át; a Magyar Immunológiai Társaság főtitkára (1970–78) majd elnöki tisztét (1978–86) töltötte be. Tudományos munkásságának nemzetközi elisme-

rése volt, hogy 1978-ban megválasztották az EFIS (European Federation of Immunological Societies) alelnökének, és 1980–83 között elnökének. Ő volt az EFIS első kelet-európai tisztségviselője, és elnöksége alatt számos olyan kezdeményezése valósult meg, amely segítette a kelet-európai országok felzárkózását a nyugat-európai tudományos színvonalhoz.

Gergely János számára a tanszék körüli tevékenység, a tudományos munka, a szakmai megbeszélések mindig nagyon fontosak voltak; ahogyan ő maga mondta egy interjúban: az immunológia volt az élete. De ebbe az életbe még nagyon sok minden belefért: koncertek, filmek, színház és rengeteg könyv. Naprakészen tájékozott volt a kultúra szinte minden területén. Irigylésre méltóan sokat olvasott, könnyen adódott bármikor téma, amit meg kellett vitatni. Igényét arra, hogy oldott formában beszéljünk az immunológia mellett egyéb dolgokról is, jól illusztrálja, hogy megalapította az Akadémián a Kesztyűasztaltársaságot, ahol számos emlékezetes és élénk vita zajlott le. Mindemellett nagyon érdekelték a legújabb technikai újítások is; 80 évesen is irigylésre méltó könnyedséggel használta a számítógépet, mindig fogékonyan az újabb programokra is.

Kiváló előadó volt, aki nemcsak felkeltette az érdeklődést a tárgy iránt, de bármikor készségesen rendelkezésre állt egy-egy kérdés alaposabb megvitatására is. Lehetőséget adott sok akkori fiatal pályakezdő számára, hogy a laboratóriumban dolgozva mélyítse tovább ismereteit. Az általa kialakított műhely és iskola hatása mindmáig érzékelhető; Gergely János környezetében ismerkedett meg a modern immunológia alapjaival a ma itthon vezető pozícióban levő immunológusok jelentős része, A tanítványok közül a külföldre kerülők is neves egyetemek meghatározó

professzorai lettek. Oktatói elkötelezettségét mutatja az is, hogy éveken át vállalta az immunológia előadását német nyelven a SOTE-n.

Kutatói és oktatói munkájának elismerésül számos díjban és kitüntetésben részesült – köztük az alábbiakban: Akadémiai Díj (1975), Széchenyi-díj (1992), ELTE Aranyérem (1993 és 1996), Pázmány Péter Felsőoktatási Díj (2001), Szilárd Leo Professzori Ösztöndíj (2001), Semmelweis Ignác-emlékérem (2005), Pro Renovanda Cultura Hungariae alapítványi fődíj (2006), Magyar Köztársasági Érdemrend középkeresztje (2006). 2005-ben az Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2007-ben a Debreceni Egyetem avatta díszdoktorává. Tudományos és közéleti tevékenységének elismerésül szülővárosa, Karcag 2004-ben díszpolgárává választotta.

Nagyon sokan vagyunk, akikben hatalmas úr marad Gergely János professzor – vagy ahogyan sokan neveztük: Tanár Úr – távozásával. Sokan vagyunk, akik ezután gyakran átgondoljuk egy-egy döntő lépés előtt, vajon Tanár Úr mit mondana, hogyan oldaná meg ezt vagy azt a kérdést. És nemcsak a tudományos problémák esetében lesz ez így, hanem a személyes vagy más embereket is érintő ügyek kapcsán is. Széleskörű műveltsége, humanizmusa és felejthetetlen humora, amivel sok feszült helyzetet oldott fel egy pillanat alatt, nagyon hiányzik majd. Sokféle dolgot tanulhattunk meg Tőle, vagy legalábbis igyekeztünk elsajátítani az együtt töltött évtizedek során – több-kevesebb sikerrel. A hátrahagyott örökség olyan gazdag, hogy sokaknak jut belőle. Mindannyiunk feladata fenntartani és továbbvinni az általa megkezdett dolgokat a már mércévé vált magas színvonalon és nem utolsósorban folyamatosan megújítani, ahogyan Tanár Úr is mindig tette.

Erdei Anna

Kitekintés

FÁJDALMAS BRIT TUDOMÁNPOLITIKAI DÖNTÉSEK

Gordon Brown brit miniszterelnök hivatalba lépése után új, a kutatásért és a felsőoktatásért felelős minisztériumot hozott létre. Nyilatkozata szerint a kormány hosszú távú célja, hogy Britannia a világ egyik legjobb helye legyen a tudomány, a kutatás és az innováció számára. (*Kitekintés, Magyar Tudomány* 2007/10).

Újjászervezték a brit tudományos és műszaki alapokról döntő testületeket, az átszervezés nagy vesztese a részecskefizika és a csillagászat. Októberben a kormány nagyobb támogatást ígért a tudománynak a következő három évre. Elsősorban az orvos-biológiai és környezetvédelmi tanulmányokat, a biztonsági intézkedéseket és más olyan területeket támogattak kiemelten, amelyek rövid távon társadalmilag hasznos alkalmazásokat ígérnek. A többi területnek az inflációval lépést tartó támogatást ígérték. Decemberben azonban a Science and Technology Facilities Council (STFC) hároméves terveiből a részecskefizika és a csillagászat támogatásának jelentős visszafogása derült ki. Két jelentős tervezett létesítmény támogatását teljesen megszüntették, a következő nemzetközi óriás részecskegyorsító (International Liner Collider, ILC) és a 8 méteres Gemini teleszkópok az áldozatok. Az Egyesült Királyság kilép a világ két vezető földi gamma-sugárzást figyelő teleszkóp rendszeréből is (HESS, VERITAS) és az Észak-Skandináviában a napszél és az atmoszféra kölcsönhatását tanulmányozó EISCAT radar-

hálózatból. (A HESS mérőrendszeréről lásd *Kitekintés, Magyar Tudomány* 2005/4.)

A tervezett részecskegyorsítóban a kutatók egyszerűbb körülmények között, elektron- és pozitronnyalábok ütköztetése során vizsgálhatnák az igen nagy energiákon megjelenő új részecskéket. (Az ILC-ről lásd még *Kitekintés, Magyar Tudomány* 2007/5.) A sokféle résztvet egy nemzetközi tervezőcsoport összehangolta és egységes koncepciót dolgozott ki. Eszerint egy 35 km hosszú berendezés épülne, költsége inflációval nem számolva 6,65 milliárd dollár, építése 13 000 ember-év munkát igényel, mindkét számadat bizonytalansága 30 %. Britannia volt az ILC együttműködés egyik vezető európai tagja. Eddig évente 5 millió fontot költöttek az ILC detektorok fejlesztésére, nyaláboptikai kutatásokra. A részecskefizikában a CERN hamarosan működésbe kezdő új óriásgyorsítójának, az LHC-nak a mind teljesebb kihasználása a fő cél. Az ILC ügyében az amerikaiak is szkeptikusak, az Energiaügyi Minisztérium szerint nem reális az építés 2012-re tervezett elkezdése. December közepén a kongresszus az ILC tervezésére és a kapcsolódó kutatásokra tervezett 84 milliót 20 millió dollárra csökkentette.

A Gemini North teleszkóp (Mauna Kea, Hawaii) az egyetlen nagyobb ablakot jelentette brit csillagászok számára a teljes északi égbolt megfigyelésére. Az Európai Déli Observatórium (ESO) támogatását fenntartják.

A több korábbi testület utódjaként létrehozott STFC a korábbi döntéseket elemezve derítette ki, hogy a 2008–10 évekre az előd-

szervezetek által odaígért támogatás 80 millió fonttal több a ma rendelkezésre álló összegnél. A hiány két tételből származott. Az egyik a Diamond szinkrotron sugárforrás, az elmúlt 40 évben nem épült ennél nagyobb kutatóeszköz az Egyesült Királyságban. A 2003-ban építeni kezdett, ma már működő berendezésről nemrég derítette ki a kincstár, hogy a költségeket 17,5 % áfa (VAT) terheli, mivel nem költségvetési, hanem PPP beruházásnak minősül. A túllépés másik oka a természettudományi tanszékeken végrehajtott, a kutatási alapokból támogatott kutatást végző professzorokat érintő, lényeges béremelés.

Az STFC stratégiai igazgatója szerint a nehéz döntés meghozatalánál a CERN, ESO és más nemzetközi kötelezettségek megőrzése mellett figyelembe vették azokat a nagy kutatóközösségeket (biológusok, kondenzált anyagokkal foglalkozó fizikusok, anyagtudományi szakemberek), amelyek a Diamond, az ISIS spallációs neutronforrás és a nagy lézerberendezések működtetésében érdekelték.

Schwarzshild, Bertram: New UK research council abruptly abandons some major international projects, *Physics Today*, February 2008, pp. 21-22.

J. L.

ADALÉKOK A HOLD TÖRTÉNETÉHEZ

A Hold a fiatal Földbe ütközött test által kilökött törmeléből formálódott ki. A szimulációk szerint az ütközés érintőleges lehetett. A becsapódó test vasmagjának nagy része a Földbe süllyedt, szilikátköpenye elpárolgott. A Föld tömege 30 %-ának hőmérséklete elérte a 7000 kelvint, a bolygó csaknem egészen megolvadt. 100-1000 évvel később kialakult

a Hold. Mikor történt mindez? Az *Apollo* űrhajósai által hozott holdkőzetek legidősebbike 4440 millió évesnek bizonyult számárium-neodímium izotópos kormeghatározás alapján. A kőzetek volframtartalmának elemzése alapján Thorston Kleine (Zürich, ETH) és csoportja nemrég arra jutott, hogy a Hold 60-100 millió évvel a Naprendszer születése után formálódott ki. Néhány éve több kutatócsoport ugyanezzel a módszerrel elemezte a Föld történetét, eszerint a Föld magjának ki-formálódása 10-30 millió évvel követte a Naprendszer születését. A Hold tehát később keletkezett, mint eddig gondolták, azután, hogy a Föld magja és köpenye már szétvált. (*Kitekintés, Magyar Tudomány*, 2006/1).

A volframizotóparányok elemzése arra utal, hogy a Hold a Földtől örökölte kémiai jellemzőit. A két test kéreganyagának izotópos összetétele megegyezik, legalábbis azokon a területeken, ahonnan mintáink vannak, tehát a Hold anyaga földi szilikátokból származik. A hidrodinamikai szimulációk szerint viszont a holdi anyag legalább 80 %-ának a Földbe csapódott, Mars-méretű testből kellett származnia. Azonos volt a két test összetétele? Ez csak úgy lehetséges, ha a Naptól egyforma távolságban a szoláris nebula ugyanazon részéből formálódtak, és hasonlóan zajlott le a mag és a köpeny szétválása. Egy friss számítás szerint a Föld és a becsapódó test elpárolgott anyaga ezer évig keveredhetett az atmoszférában, eltűntek a különbségek. Az egyezések mellett eltérések is vannak, a Holdon például sokkal kevesebb az alkáli fém. Ezek talán a még forró, formálódó Holdról szökhetnek meg a gyengébb gravitációs tér miatt?

Wilson, Mark: Isotope-ratio measurements reveal a young Moon, *Physics Today*, February 2008, pp. 17-18.

J. L.

EMBRIÓ HÁROM SZÜLŐVEL

A Newcastle Egyetem kutatója, Patrick Chinnery neurogenetikus professzor vezetésével olyan emberi embriót hoztak létre, amelynek teljes örökítő anyaga két nőtől és egy férfitől származik. A kísérlet célja, hogy a jövőben megelőzzenek olyan örökletes betegségeket – izomsorvadás, epilepszia, szellemi fogyatékos-ság, vakság, sükettség –, amelyek a sejtmagon kívül elhelyezkedő sejtszervecske, a mitokondrium DNS-e hibáinak következtében jönnek létre. Ez az eljárás tehát nem érinti a genomiális örökítőanyagot.

Chinnery és kollégái először egy hibás mitokondriális DNS-sel rendelkező asszony petesejtjéből és egy egészséges férfi hímivarsejtjéből származó megtermékenyített petesejteket hoztak létre.

Ezt követően a megtermékenyített petesejt sejtmagját egy olyan, sejtmagjától megfosztott petesejtbe helyezték át, amely egészséges nőből származott, tehát a mitokondrium örökítőanyaga egészséges volt. (A mitokondriális DNS mindig a nőből származik, a hímivarsejtek a megtermékenyítéskor nem „adják át” a sejtszervecskét.)

Tíz ilyen embriót konstruáltak, ezeket azonban csak öt napig hagyták életben.

Chinneryék remélik, hogy – további kísérletek után – néhány éven belül rendelkezésre áll majd egy olyan mesterséges megtermékenyítési eljárás, amelynek során hibás mitokondriális DNS-t hordozó asszonyoknak is egészséges gyermekük születhet.

Kísérleteikről tudományos publikációt még nem közöltek, eredményeikről egy konferencián számoltak be.

bbc.co.uk, 2008. február 5.

G. J.

ABLAK AZ ALZHEIMER-KÓRRA

Új megvilágításba helyezi az Alzheimer-kór kialakulásának mechanizmusát a Harvard Egyetem kutatóinak a *Nature*-ben publikált eredménye. A betegség kapcsán régóta folyik a vita, hogy az agyban megfigyelt jellegzetes fehérjelerakódások (amiloid plakkok) vajon okai vagy következményei-e a betegségnek.

Bradley Hyman és munkatársai (Harvard Medical School) genetikailag módosított egereket hoztak létre, amelyeknél a mesterséges mutáció fehérjelerakódásokat, illetve idegrendszeri betegségeket okozott. Az állatok koponyájából egy kis darabot eltávolítottak, és a kapott kis ablakon át megfigyelték az élő egerek agyának szerkezetében bekövetkező változásokat. Meglepetésükre azt találták, hogy plakkok nagyon gyorsan, akár egyetlen nap alatt is kialakulhatnak. Néhány nappal ezután, az idegsejtek támogatására szolgáló ún. mikroglia sejtek csoportosulni kezdtek a lerakódások körül, és két hét elteltével már a környező idegsejtek nyúlványai is deformálódtak.

A kutatók hangsúlyozzák, hogy egyelőre semmi nem bizonyítja, hogy embernél is hasonló folyamatok okozzák a betegségeket, de ha igen, akkor merőben új stratégiák szükségesek az Alzheimer-kór gyógyításához: elsősorban a megelőzés és az igen korai kezelés jöhet szóba. A plakkok kialakulása ugyanis annyira gyors, hogy a tünetek megjelenésekor már túl nagy az agy károsodása.

Meyer-Luehmann, Melanie et al.: Rapid Appearance and Local Toxicity of Amyloid- β Plaques in a Mouse Model of Alzheimer's Disease. *Nature*. 2008. 451, 720–724.

G. J.

Jéki László – Gimes Júlia

Könyvszemle

Benedek pápa könyve Jézusról

Benedek pápa Jézusról szóló kötetének megjelenése különleges esemény a magyar közönség számára: egy pápa teológusi minőségben írt tudományos munkáját vehetjük kezünkbe. Voltak a Katolikus Egyház történetében más nagy tudósok is, akik pápa korukban tettek közzé jelentős műveket. Hogy csak néhány példát említsünk: Sinibaldo dei Fieschi már IV. Ince pápaként (1243-1254) fejezte be a IX. Gergely dekretális-gyűjteményéhez írott nagy kommentárját, melyet később a kánonjogászok mindig a pápa nevére hivatkozva, de természetesen a tudós szerzők sorában idéztek. XIV. Benedek pápa pedig évekkel pápává választása után, 1748-ban adta ki a *De synodo dioecessano* című, nagyhatású munkáját más fontos könyveihez hasonlóan. E kiadások címlapján szerzőként a pápa felvett neve áll, a szakirodalom is pápaként hivatkozik a szerzőjére, nem pedig korábban használt személynévén, Prospero Lambertiniként. A jelen kötet esetében – az eredeti német, illetve az olasz kiadás címlapján éppúgy, mint a magyar fordítás elején – szerzőként mind a korábbi személynév, mind a pápai név szerepel. Ennek oka lehet az is, amit az előszóban maga a szerző jegyez meg: a munkát még 2003-ban kezdte el, majd pápává választása után fejezte be (18-19. old.). A kötet egyébként címében is jelzi, hogy egy mű első része kíván lenni. Ha ennek a kötetnek a tematikáját tartjuk szem előtt, vagyis az előszó és a tudománytörténeti bevezetés után a fő részeket (1.

Jézus megkeresztelkedése; 2. Jézus megkísértései; 3. Isten országának evangéliuma; 4. A hegyi beszéd; 5. Az Úr imája; 6. A tanítványok; 7. A példabeszédek üzenete; 8. A nagy jánosi képek; 9. Két fontos mérföldkő Jézus útján: Péter hitvallása és a színeváltozás; 10. Jézus kijelentései önmagáról), akkor nyilvánvalóvá válik, hogy a következő részben Jézus szenvedéséről, haláláról, feltámadásáról kerül majd szó, de a szerző ígérete szerint a gyermekérettörténetre is szándékozik kitérni (19. o.).

Benedek pápa könyvében arról ír, aki számára és az egész Egyház számára is a legtöbbet jelenti: Jézus Krisztusról. Ám a könyv címe mégsem a Krisztus jelző, vagyis a felkent, a Messiás címét említi, hanem a Názáretiről beszél. Magának a címnek a megválasztásában is érezhető tehát a történelmi Jézus megközelítésének szándéka. Ugyanakkor az egész mű gerincét az a meggyőződés alkotja – és minden bizonnyal ennek kifejezése a szerző legfőbb szándéka –, hogy a történeti Jézus nem választható el attól, akit a XX. században sokan a *hit Krisztusának* neveztek. És valóban, Benedek pápa munkája benne áll a XX. századi bőséges Jézus-irodalomnak a sodrában. Eleinte, mondjuk a XIX. és XX. század fordulóján a Jézus-élete-kutatás jelezte a tudományos erőfeszítések egyik fővonulatát. Már 1916-ban Albert Schweitzer, az akkori strassburgi magántanár kísérletet tett a Jézus-élete-kutatás történelmi összefoglalására (Von Reimarus zu Wrede. Eine Geschichte der Leben-Jesu-Forschung). Ennek a kutatásnak a liberális irányzata Márk evangéliumából

indult ki, mely a szenvedés útja kinyilatkoztatásának kiindulópontját a Fülöp Cezaréájában elhangzó vallomás idejére teszi. Ez az a pillanat, mikor Péter megvallja felismerését, hogy Jézus a Messiás (Mk 8,29-30). Nem véletlen, hogy Benedek pápa könyve is külön alfejezetet szentel ennek a mozzanatnak (240-253. o.). A módszer természetesen, melyet W. Wrede (Das Messiasgeheimnis in den Evangelien, Göttingen 1901) és nyomában mások alkalmaztak, egyrészt nagy bizalmat fejez ki Márk elbeszélésének történeti értéke iránt, másrészt pszichológiai reflexiók segítségével igyekszik a bibliai hagyományban szereplő és kritikailag megrostált többi anyagot a Márk-féle elbeszélés keretei közé illeszteni. E felfogást azonban már a XX. század elején több oldalról is megkérdőjelezték. Egyrészt Adolf Harnack már 1874-ben, habilitációs tézisében azt állította, hogy Krisztus életét nem lehet megírni, mivel az evangéliumokban csak a szóbeli hagyomány olyan összekapcsolt különálló darabjait találjuk, melyek „nem szolgáltatnak elegendő anyagot Jézus életének megírásához”. Ezen a vonalon halad tovább Wellhausen (Einleitung in die drei ersten Evangelien, Berlin 1905, 51), aki az evangéliumok irodalmi jellegére tekintettel lemond Jézus élettörténetének kritikai megírásáról, viszont mindez nem akadályozza meg abban, hogy egy *képet* rajzoljon Jézusról, aki „az Isten országának gondolatát a vallási szférába emelte”, és akinek életében „Isten olyan eleven valóság volt”, mint soha más ember életében. Ezt a Jézusról alkotott képet azonban más oldalról kezdték megengatni. J. Weiss már 1892-ben hangsúlyozta, hogy szerinte Jézus az Isten országát közvetlen közeli valóságnak fogta fel, és ebben az összefüggésben áll erkölcsi követelményeinek rendszere éppúgy, mint az a meggyőződése, hogy ő az Emberfia.

Ilyen előzmények után a formatörténeti módszert alkalmazó evangéliumkutatás még radikálisabb gondolatokat vetett fel. Az a fel fogás, hogy az evangéliumok keretbe foglalt részlethagyományokat tartalmaznak, egyfelől szinte kizárni látszott Jézus élete és tanítása kronológiai bemutatásának lehetőségét, másfelől felhívta a figyelmet a hagyomány alakulására a hívő közösségekben. Ezzel felmerült annak kísértése, hogy lemondjanak Jézus bármiféle életrajzának rekonstruálásáról. Ilyen háttér esetén azonban Jézus tanításának bemutatása is igen nagy nehézségeket vetett fel, és fokozta annak igényét, hogy kritikai módszerekkel keressék a Bibliában a Jézusról szóló *legrégibb* hagyományelemeket. Ezért a német nyelvterületen az 1920-as évektől már nem volt jelentős törekvés arra, hogy „Jézus életét” írják meg. Mégis többen részletes munkákat szenteltek Jézus bemutatásának. Ennek során csupán Rudolf Bultmann (Jesus, Tübingen 1926) szorítkozott arra, hogy kizárólag Jézus igehirdetéséből merítse anyagát. A formatörténeti megállapításokat nem követő szakirodalomban azonban, például J. Klausner 1922-ben héberül, majd 1930-ban német fordításban is megjelent munkájában (Jesus von Nazareth) más szempontok kerülnek előtérbe, például a zsidó párhuzamok. A 20-as évek során ismét Bultmann volt az, aki Jézus történetét mellőzve kutatásának tárgyául „a gondolatoknak azt az összességét” választotta, mely „a hagyomány legrégebbi rétegében található”. Bultmann szerint tehát nem szabad az Ősegyház igehirdetése, a kérügma mögé tekinteni, hogy egy „történeti Jézust” rekonstruáljunk. Ezzel szemben ő kizárólag a „hit Krisztusára” összpontosítja figyelmét és eljut egészen addig a kijelentésig, hogy „nem a történeti Jézus, hanem Jézus Krisztus, akit hirdettek, ő az Úr” (Glauben und Verstehen,

I, 5. kiad. Tübingen 1964, 208). A bultmanni tézis ellenhatásaként Joachim Jeremias, Rudolf Otto és mások teológiailag lényegesnek tartották a történeti Jézus alakjának és igehirdetésének kérdését. A XX. század közepétől azonban a különböző felekezetekhez tartozó biblikusok körében egyre világosabbá vált, hogy a történelmi Jézusra irányuló kérdést a hit szempontjából is fel kell tenni, továbbá hogy Jézus történetének viszonylagos homályából igenis jellemző vonások rajzolódnak ki igehirdetésének tartalmát illetően, „és hogy az egyetlen kategória, mely igényének megfelelt... az, amelyet tanítványai tulajdonítottak neki, vagyis, hogy ő a Messiás” (E. Käsemann, *Exegetische Versuche und Besinnungen* I, 3. kiad. Göttingen 1964, 206, 213).

A történeti-kritikai kutatás egyrészt a hagyomány egyre kifinomultabb megismeréséhez vezetett, másrészt Jézus alakja, akire maga a hit irányul, sokak szemében elhalványodott. Az evangélisták és a forrásaik hagyományai mögött álló Jézus személyének rekonstrukciói azonban sokfélék voltak, s gyakran egymással egészen ellentétre sikerültek.

Benedek pápa Jézus-ábrázolása egyrészt szem előtt tartja a történeti-kritikai módszer értékeit, másrészt számol annak határaival is. A szerző meggyőződése, hogy a történeti-kritikai módszer túlmutat önmagán és „belsőleg nyitott a kiegészítő módszerek felé”. A Szentírás vizsgálata során módszertani elvként tartja szem előtt az Amerikában az utóbbi 30 évben kidolgozott „kánoni egzegézis” programját, mely a legjobb tradícióknak megfelelően az egyes szentírási szövegrészeket az egyetlen Biblia egészének összefüggésében olvassa. Ezt a módszertani elvet a II. Vatikáni Zsinat *Dei verbum* kezdetű rendelkezésének 12. pontja is hangsúlyozza, hozzáfűzve, hogy ennek a Biblia egységében való értelmezésnek

a során szem előtt kell tartani az Egyház eleven hagyományát és a hit analógiáját is. A Szentírás egyes könyveinek szerzői „nem önálló írók a szó modern értelmében, hanem Isten népének történelmi alanyához tartoznak, amelyből kiindulva és amelyhez szólnak, s amely ekképpen valójában az íráskor ’szerzője’, a szó mélyebb értelmében. Ám ez a nép sem önmagában áll, hanem tudja, hogy maga Isten vezeti, és Isten szólítja meg, aki – emberek által és az emberek adottságain keresztül – az emberi szavak legmélyén beszél” (16. o.). Hogy Benedek pápa mennyire szem előtt tartja megközelítésében a Szentírás egységét, azt világosan jelzi egyrészt az általa idézett ószövetségi helyek sokasága (325–328. o.), másrészt az Újszövetség evangéliumokon kívüli részeire való hivatkozások, valamint a keresztény biblikusokon és teológusokon kívül az olyan szerzők bőséges és hangsúlyos idézése is, mint Jacob Neusner, akinek „A Rabbi talks with Jesus” (New York 1993, németül: München 1997) című munkáját gyakran és hangsúlyosan idézi. Ő maga a nyolc boldogság és a hegyi beszéd összefüggésében „a Messiás Tórájáról” beszél (vö. 95–116. o.). Benedek pápa Jézus-könyvének alapvető mondanivalója már az első kötet alapján világosan kirajzolódik: az evangéliumok Jézusa az igazi, a történelmi Jézus, vagyis a személyére épülő hit életének, egyéniségének és tanításának történelmi valósága nélkül nem alakulhatott volna ki, és nem állhatná meg a helyét.

Köszönet illeti Rokay Zoltánt, a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Hittudományi Karának professzorát a pontos és stilisztikailag is értékes fordításért. Ugyancsak elismerést érdemel, hogy a kiadó a kötethez járuló tudományos apparátust (irodalmi utalások: 293–303. o.) világos tipográfiával közölte és hozzá Sajgó Krisztián összeállításában rövidítések

és glosszáriumot is tartalmazó kiadói függelék csatol (305–324. o.). A kötetet a bibliai helyek mutatója (325–334. o.) és a tulajdonnevek mutatója (335–340. o.) zárja. Őszintén kívánjuk, hogy nyújtson ez a kötet biztos és vonzó ismeretet Jézus személyéről és láttassa hitelesen az Egyház meggyőződését szemé-

lyével kapcsolatban hívő és nem hívő olvasó számára egyaránt. (*Joseph Ratzinger, XVI. Benedek: A Názáreti Jézus. Első rész. A Jordánban való megkeresztelkedéstől a színeváltozásig, Budapest: Szent István Társulat, 2007, 340 p.*)

Erdő Péter

az MTA levelező tagja



HELYREIGAZÍTÁS • A *Magyar Tudomány* 2008/2. számában *Átalakulás és nem rendszerváltás?* címmel megjelent, Csehi Zoltán által készített könyvismertetésben az a téves állítás olvasható, hogy „a recenzált kötet [Jakab András–Takács Péter (szerk.): *A magyar jogrendszer átalakulása 1985/1990–2005. Jog, rendszerváltozás, EU-csatlakozás. I-II. Gondolat Kiadó–ELTE Állam- és Jogtudományi Kar, 2007, Budapest*] alapjául szolgáló tudományos konferenciát Cs. Kiss Lajos szervezte”. A konferenciát a recenzóban írtakkal ellentétben a kötet szerkesztői, Jakab András és Takács Péter szervezték. A konferencián Cs. Kiss Lajos szekcióvezetőként működött közre.

CONTENTS

*Bridges – from Theory to Engineering Practice**Guest Editor: László P. Kollár*

László P. Kollár: Introduction	386
László Dunai – István Hegedűs – László P. Kollár – Tamás Lajos: Theoretical and Experimental Studies Related to the Structural Design of the Pentele Bridge in Dunaújváros	394
Adrián Horváth – Zoltán Nagy: The Design of Pentele Danube-bridge at Dunaújváros ...	410
Matasčík Miroslav – Zoltán Agócs: Apollo – A New Danube Bridge in Bratislava	429
Sándor Kisbán: The M0 Motorway Cable-Stayed Danube Bridge in Budapest.	435
Péter Wellner: Valleybridge at Köröshegy	441
László Mátyássy: At a Height of 80 m above the Ground – Design of the Superstructure of the Köröshegy Viaduct	450

Study

Károly Reményi – Gyula Gróf: Notes on Global Warming	458
László Somlyódy: Reflections on water: we are forced to move	462
József Pálinkás: Trying the Limits of Human Imagination: Tracking the Collisions of Atoms	474
György Gyürky: Stars and Atomic Nuclei	486
László Keviczky: „Controllare” necesse est	494

Academy Affairs

Statement in the Defence of Darwin's Evolutions Theory	506
Notice by Five Departments of MTA on Natural Science Education	507
Appeal from the Széchenyi Prize Winner members of MTA in Szeged to the 100 Richest Hungarians	509
Scientists Awarded on the 15 th March National Holiday	510

Obituary

János Gergely (Anna Erdei)	514
----------------------------------	-----

<i>Outlook (Jéki László – Gimes Júlia)</i>	517
--	-----

<i>Book Review</i>	520
--------------------------	-----

Ajánlás a szerzőknek

1. A Magyar Tudomány elsősorban a tudományterületek közötti kommunikációt szeretné elősegíteni, ezért elsősorban olyan kéziratokat fogad el közlésre, amelyek a tudomány egészét érintő, vagy az egyes tudományterületek sajátos problémáit érthetően bemutató témákkal foglalkoznak. Közlünk téma-összefoglaló, magas szintű ismeretterjesztő, illetve egy-egy tudományterület új eredményeit bemutató tanulmányokat; a társadalmi élet tudományokkal kapcsolatos eseményeiről szóló beszámolókat, tudománypolitikai elemzéseket, szakmai szempontú könyvismertetőket.

2. A kézirat terjedelme szöveges tanulmányok esetében általában nem haladhatja meg a 30 000 leütést (a szóközökkel együtt, ez kb. 8 oldalnak felel meg a MT füzeteiben), ha a tanulmány ábrákat, táblázatokat, képeket is tartalmaz, a terjedelem 20–30 %-kal nagyobb lehet. Beszámolók, recenziók esetében a terjedelem ne haladja meg a 7–8 000 leütést. *A teljes kéziratot .rtf formátumban, mágneslemezen és 2 kinyomtatott példányban kell a szerkesztőségbe beküldeni.*

3. A közlemények címének angol nyelvű fordítását külön oldalon kell csatolni a közleményhez. Itt kérjük a magyar nyelvű kulcsszavakat (maximum 10) is. A tanulmány címe után a szerző(k) nevét és tudományos fokozatát, a munkahely(ek) pontos megnevezését és – ha közölni kívánja – e-mail-címét kell írni. A külön lapon kérjük azt a *levelezési és e-mail címet*, telefonszámot is, ahol a szerkesztők a szerzőt általában elérhetik.

4. Szöveg közbeni kiemelésként *dőlt*, (esetleg *félkövér* – semibold) betű alkalmazható; ritkítás, VERZÁL betű és aláhúzás nem. A jegyzeteket lábjegyzetként kell megadni.

5. A rajzok érkezhetnek papíron, lemezen vagy email útján. Kérjük azonban a szerzőket: tartsák szem előtt, hogy a folyóirat fekete-fehér; a vonalas, oszlopos, stb. grafikonoknál tehát ne használjanak színeket. Általában: a grafikonok, ábrák lehetőség szerint minél egyszerűbbek legyenek, és vegyék figyelembe a megjelenő oldalak

méreteit. A lemezen vagy emailben érkező ábrákat és illusztrációkat lehetőleg *.tif* vagy *.bmp* formátumban kérjük; értelemszerűen fekete-fehérben, minimálisan 150 dpi felbontással, és a továbbítás megkönnyítése érdekében a kép nagysága ne haladja meg a végleges (vagy annak szánt) méreteket. A közlemény szövegében tüntessék fel az ábrák kívánatos helyét.

6. Az irodalmi hivatkozásokat mindig a közlemény végén, abc sorrendben adjuk meg, a lábjegyzetekben legfeljebb utalások lehetnek az irodalomjegyzékre. Irodalmi hivatkozások a szövegben: (szerző, megjelenés éve). Ha azonos szerző(k)től ugyanabban az évben több tanulmányra hivatkozik valaki, akkor a közleményeket az évszám után írt a, b, c jelekkel kérjük megkülönböztetni mind a szövegben, mind az irodalomjegyzékben. Kérjük, *fordítsanak különös figyelmet a bibliográfiai adatoknak a szövegben, illetőleg az irodalomjegyzékben való egyeztetésére!* Miután a Magyar Tudomány nem szakfolyóirat, a közlemények csak a legfontosabb hivatkozásokat (max. 10–15) tartalmazzák.

7. Az irodalomjegyzéket abc sorrendben kérjük. A tételek formája a következő legyen:

• Folyóiratcikkek esetében:

Alexander, E. O. and Borgia, G. (1976). Group Selection, Altruism and the Levels of Organization of Life. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* **9**, 499–474

• Könyvek esetében:

Benedict, R. (1935). *Patterns of Culture*. Houghton Mifflin, Boston

• Tanulmánygyűjtemények esetén: von Bertalanffy, L. (1952). Theoretical Models in Biology and Psychology. In: Krech, D., Klein, G. S. (eds) *Theoretical Models and Personality Theory*. 155–170. Duke University Press, Durham

8. Havi folyóirat lévén a *Magyar Tudomány* kefelevonatot nem küld, de az elfogadás előtt minden szerzőnek elküldi egyeztetésre közleménye szerkesztett példányát. A tördelés során végzett, apró változtatásokat a szerző egy adott napon a szerkesztőségben ellenőrizheti.

ACADEMIAI ÉRTESÍTŐ.

XII. Év.

1852. JULIUS.

V. Sz.

KIS GYÜLÉS, JUL. 3. 1852.

(A' történettudományi osztály' részére).

Kubinyi Ágoston tiszt. tag' helyettes elnöklete alatt

Jelen az osztályból : Bajza, Érdy, Wenzel rr. és l. tt. — Egyéb osztályokból : Balogh, Bugát, Gebhardt, Győry, Kállay rr. tt. — Csorba, Hunfalvy, Pauler, Repicky ll. tt. — Toldy Ferencz titoknok.

ÉRDY JÁNOS rt.

ezt a' kérdést fejtegette : *Van-e Robert Károly királynak szerb veretű érme?*



Az itt látható érmet Zanetti adta ki száz évvel ezelőtt, saját gyűjteményéből, mely többé nem is fordult azóta elé. Ez éremnek *előlap* körirata jobbról : KARVLVS, balról : S STEFAN; *képvete* : szent István első vértanú, Szerbország' védszentje, fénykörös fővel állva, jobbával magas, alul egyenkarú átlikasztott kereszttel ékes zászlót nyújt a' jobbról, szerb díszöltözetben álló koronás királynak, baljában könyv. A' király jobbával a' zászlóhoz nyúl, baljában vezénybot. A' király és zászló között REX olvasható.

Hátlapjának fölirata : IC XC azaz : Jesus Christus. *Képvete* : Krisztust fénykörös fejjel, palástosan karszékben ülve 's könyvet tartva állít elé; a' téren két lilium látható.

Zanetti következőleg szól róla : „E' szorgalommal rézre véselt magyar érmet itt adjuk legelőször. Az érem ezüst, súlya 's vete mind a' leírott (szerb); mind pedig a' velencei példányokéhoz hasonló, tartalmát kivéve, mely sokkal silányabb ötvű. Birtokunkban volt, minapában adtuk oda barátunknak ajándokul. Mi az érmet Robert Károly magyar királynak tulajdonítjuk, ki azt akkor veretű,